



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Uma metodologia de localização *Indoor* híbrida para sistemas móveis

Hilário José Silveira Castro

Orientador: Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: M531
Natal, RN, Julho de 2018

Divisão de Serviços Técnicos

Catalogação da publicação na fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Castro, Hilário José Silveira.

Uma metodologia de localização Indoor híbrida para sistemas móveis
/ Hilario Jose Silveira Castro. - 2018.
101f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2018.

Orientador: Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva.

1. Localização Indoor - Dissertação. 2. Sensores - Dissertação. 3. Sistemas de redes sem fio - Dissertação. 4. Sistemas Inerciais - Dissertação. 5. Sistemas Híbridos - Dissertação. I. Silva, Ivanovitch Medeiros Dantas da. II. Título.

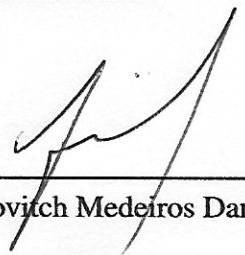
RN/UF/BCZM

CDU 004.73

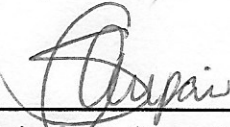
Uma metodologia de localização *Indoor* híbrida para sistemas móveis

Hilário José Silveira Castro

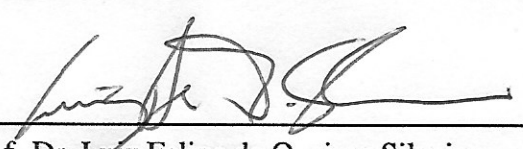
Dissertação de Mestrado aprovada em 09 de julho de 2018 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



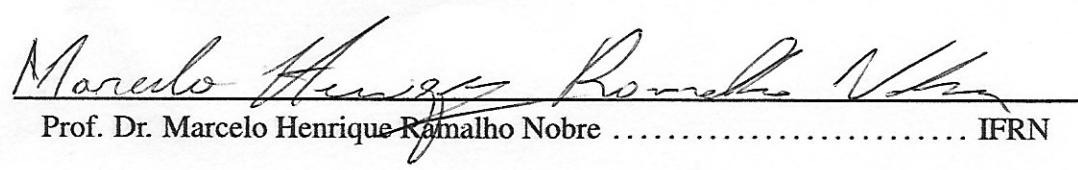
Prof. Dr. Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva (orientador) IMD/UFRN



Prof. Dr. Silvio Costa Sampaio IMD/UFRN



Prof. Dr. Luiz Felipe de Queiroz Silveira DCA/UFFN



Prof. Dr. Marcelo Henrique Ramalho Nobre IFRN

*Muito obrigado minha Avó Nicacia
Lopes da Silveira, que com seu
sorriso gentil e suas palavras de
apoio, me incentivou a continuar
nessa jornada. Que seu descanso
seja eterno e em paz.*

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Ivanovitch, e professor Silvio, sou grato pela oportunidade, orientações e paciência por lidar com meus erros.

A minha esposa, Ana Clarissa, que me deu apoio emocional e toda torcida nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Valdelucia e José Domingos, pelo apoio durante esta jornada.

A todos meus amigos, que escutaram minhas frustrações e me deram suporte emocional.

A toda equipe do IFRN, UFRN e SENAI, por proporcionarem um ambiente de trabalho que me inspira a seguir nessa carreira.

Resumo

Nos últimos anos o desenvolvimento tecnológico tem permitido o surgimento de diversas aplicações e serviços de localização, com destaque para as soluções de localização em ambientes internos - *indoor* (rastreamento de objetos, ativos e pessoas, marketing de precisão, segurança, entre outros). É sabido que soluções tradicionais de localização, como por exemplo o Sistema Global de posicionamento (*Global Positioning System* - GPS) não apresentam resultados satisfatórios para cenários *indoor* e que outras soluções já existem na literatura. Nesse trabalho é fornecido uma nova solução para o problema de localização *indoor* baseado em multiplicidade de fontes e protocolos de comunicação, método de trilateração, rastreo de movimentação, sensores inerciais e algoritmos para mitigação de deturpações de propagação de sinais com o intuito de aumentar a precisão da solução. Resultados indicaram a factibilidade da proposta com erros médios de 1,224 metros em cenários típicos de prédios densamente populados.

Palavras-chave: Sistemas de Localização *Indoor*, Sistemas Inerciais, Sensores, Redes sem Fio, Automação.

Abstract

In recent years technological development has allowed the emergence of several applications and location services, with emphasis on localization solutions in indoor environments (tracking of objects, assets and people, precision marketing, security and others). It is known that traditional localization solutions, such as the Global Positioning System (GPS) do not present satisfactory results for indoor scenarios and that other solutions already exist in the literature. On this work, a new solution is provided to the indoor location problem based on multiplicity of communication sources and protocols, trilateration method, motion tracking, inertial sensors and algorithms for mitigation of signal propagation misrepresentations with the intention increase the accuracy of the solution. Results indicated the feasibility of the proposal with average errors of 1,224 meters in typical scenarios of densely populated buildings.

Keywords: Indoor Location System, Inertial System, sensors, wireless network, automation .

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Sistemas de Localização	1
1.2 Sistemas de Localização <i>Indoor</i>	2
1.3 Motivação	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Organização do trabalho	5
2 Trabalhos relacionados	7
2.1 Sistemas Baseados em Redes	7
2.1.1 Métodos baseados em alcance fixo	8
2.1.2 Métodos baseados em alcance livre	9
2.2 Sistemas Inerciais	11
2.3 Sistemas híbridos	12
2.4 Número de Âncoras	13
2.5 Discussões	14
3 Fundamentação Teórica	17
3.1 Propagação de sinais e a distância entre dispositivos	17
3.1.1 Propagação de sinais	18
3.1.2 Modelo de propagação Log-Distância	20
3.2 Padrões tecnológicos de transmissão	23
3.2.1 <i>Wi-Fi</i>	24
3.2.2 <i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i>	25
3.3 Trilateração	26
3.3.1 Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)	27
3.4 PDR e Sistemas Inerciais	30
3.4.1 Acelerômetro	31
3.4.2 Magnetômetro	34

3.4.3	Sensor Orientação	35
3.4.4	Contador de Passos	37
3.5	Filtro de Kalman	38
3.5.1	Grupo de Predição	39
3.5.2	Grupo de Atualização	39
4	Metodologia	41
4.1	Formulação do Problema	41
4.2	Descrição do caso de uso	42
4.3	Visão geral e fluxograma de execução da metodologia	42
4.4	Coordenadas por Sistemas de redes de Transmissores	43
4.4.1	Determinação das distâncias entre dispositivos	44
4.4.2	Método para definição de desvanecimento de larga escala	45
4.4.3	Correção de distância	47
4.4.4	Trilateração	49
4.5	Coordenadas por sistemas inerciais	50
4.5.1	Detector de passos	51
4.5.2	Sensor Orientação	52
4.5.3	PDR	52
4.6	Geração da coordenada híbrida	53
4.6.1	Filtro de Kalman	53
5	Experimentos e análise de resultados	55
5.1	Descrição do ambiente de testes	55
5.2	Hardware utilizado e localização das âncoras	55
5.3	Estrutura dos dados	56
5.4	Experimentos e análise de resultados	57
5.4.1	Avaliação da distância entre estações	58
5.4.2	Método convencional de Trilateração X Trilateração com correção de âncoras	60
5.4.3	Comparação entre o método proposto e os modelos base	61
5.4.4	Sintonia do Filtro de Kalman	63
5.4.5	Escolha do tempo de atualização de coordenada	64
5.4.6	Impacto pelo quantitativo de âncoras	66
6	Conclusão	69
6.1	Trabalhos Futuros	70
6.2	Publicações	71
	Referências bibliográficas	72

Lista de Figuras

1.1	GPS necessita de linha de visão direta entre o satélite e receptor, tornando resultados inadequados para ambientes <i>Indoor</i>	2
1.2	Exemplo de ambiente de um Shopping, com serviços oferecidos pelos empreendimentos para possíveis clientes por meio da comunicação de transmissores e smartphones.	4
2.1	Aferimento de coordenadas por meio de AoA.	8
2.2	Exemplo de aferimento de coordenadas por trilateração.	9
2.3	Na criação de uma <i>fingerprint</i> são criados <i>clusters</i> de RSSI de um ambiente.	10
2.4	Rastreo da ocorrência de movimento pela oscilação da mão do usuário.	12
2.5	Estimação de coordenada híbrida com base na combinação de coordenadas de um sistema baseado em redes e um sistema inercial.	16
3.1	T2 está em <i>NLOS</i> com o <i>Smartphone</i> , enquanto T1 está em <i>LOS</i>	19
3.2	Nível de intensidade de um sinal ao longo da propagação, com $\eta = 2$	21
3.3	Nível de intensidade de um sinal ao longo do deslocamento com η igual a 2 e com influência de X_G	22
3.4	Histograma de RSSI a 6 metros de distância.	22
3.5	Localização da coordenada esta na intersecção dos três raios.	27
3.6	Estimação errada da trilateração ocasionada pelo não encontro dos três arcos em um ponto comum.	28
3.7	Visualização do método PDR e atualização de coordenadas em um plano cartesiano.	31
3.8	Aceleração nos 3 eixos de um acelerômetro em um smartphone estático em uma mesa.	32
3.9	Aceleração linear nos 3 eixos em uma caminhada de 10 passos sem influência da gravidade.	34
3.10	Leitura dos 3 eixos de um magnetômetro em um smartphone estático em uma mesa.	35
3.11	Três eixos de orientação de um smartphone	36
3.12	Mudança de orientação em uma caminhada através do eixo <i>azimute</i>	37
3.13	Contagem de passos por referências.	37
3.14	Fluxograma do Filtro de Kalman a cada medição K	40
4.1	Visão geral do caso de uso da proposta de localização <i>indoor</i>	42
4.2	Fluxograma da metodologia de localização híbrida.	43

4.3	Distância entre estações pode ser estimada no modelo de desvanecimento do sinal	44
4.4	Comparação entre η definido pelo método e outras intensidades.	47
4.5	Exemplo do não coincidir das circunferências em um ponto comum.	47
4.6	Distância entre âncoras e as circunferências centralizadas nas âncoras e com alcance até P.	48
4.7	Exemplo de Âncora corrigida seguindo a proposta de correção.	49
5.1	Segundo pavimento do Instituto Metrópole Digital, e as posições das estações <i>Wi-Fi</i> e <i>BLE</i>	56
5.2	Formato do cabeçalho dos sensores inerciais.	57
5.3	Formato do cabeçalho das coleta de RSSI das âncoras.	57
5.4	Formato do cabeçalho das âncoras conhecidas.	57
5.5	Histograma das RSSI em cada metro de distância de uma estação.	58
5.6	Exemplo de estimação de distância entre método tradicional e proposto de trilateração em três pontos diferentes.	60
5.7	Resultado de cada um dos métodos em relação ao caminho real.	62
5.8	Impacto da alteração da atualização das coordenadas nos métodos da trilateração e método proposto.	65
5.9	Impactos na trilateração e método da proposta com retirada das âncoras.	67
5.10	Correção da proposta com uso de 4 âncoras alterando os parâmetros do FK.	67
6.1	Visualização da estimação da coordenada híbrida por base do sistema baseado em redes em combinação com rastreamento do sistema inercial.	69

Lista de Tabelas

2.1	Relação de âncoras e área destacadas em alguns trabalhos.	13
2.2	Relação dos trabalhos destacados nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, com foco em: tecnologia empregada; parâmetro do sinal utilizado; princípio de posicionamento.	15
3.1	Lista de expoente de perda de percurso.	22
3.2	Divisão do espectro de frequência.	24
3.3	Medições do eixo de um acelerômetro posicionado em uma mesa.	32
3.4	Medições de um acelerômetro sem a aceleração gravitacional.	34
3.5	Medições de um magnetômetro	35
4.1	Definição de η a cada metro, utilizando RSSI de referência de -57,55 dBm, a um metro de distância. η média final 1,71.	46
4.2	Determinação do valor de aceleração de referência por meio do menor número de erros de detecção de passo em 3 caminhadas (<i>Cam.</i>) e no menor erro médio da contagem de passos.	51
5.1	Definição de η de todas as estações âncoras e suas coordenadas cartesianas.	59
5.2	Erros de estimação (em metros) máximo, médio e mínimo em 5 metros de distância para cada âncora.	59
5.3	Erros (em metros) máximo, médio e mínimo da posição dos métodos de trileração para uma posição real.	61
5.4	Erros de estimação (em metros) de cada metodologia.	61
5.5	Erro mínimo, máximo e médio da metodologia com alteração dos valores de R e Q.	63
5.6	Erro mínimo, máximo e médio dos métodos com mudança de taxa de atualização.	64
5.7	Erro mínimo, máximo e médio dos métodos com alteração do número de âncora.	66

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ADL	Análises de Discriminações Lineares
$Acel_{[i]}$	leitura pura do eixo (i) sensor de um acelerômetro
$Acelinear_{[i]}[K]$	Aceleração linear no eixo do sensor em instante de tempo (k) em um eixo(i)
AoA	Angle-of-Arrival - Ângulo de Recepção
B	Fluxo magnético
BLE	Bluetooth Low Energy
FK	Filtro de Kalman
$F_{(f)}$	Forças aplicadas em um corpo
$GNSS$	Global Navigation Satellite System - Sistemas de Navegação Global por Satélites
GPS	Global Positioning System - Sistema Global de Posicionamento
$Gravi_{[i]}[K]$	Influência gravidade sobre o corpo em instante de tempo (k) em um eixo(i) do sensor
ILS	Indoor Location System - Sistema de Localização Indoor
IMU	Inertial Measurement Units - Unidade de medição espacial
IoT	Internet of Things - Internet das Coisas
KNN	K Nearest Neighbours - K vizinhos mais próximos
$L(d_0)$	Atenuação do sinal a uma distância de referência
LBS	Location Based Services - Serviço Baseados em Localização
LOS	Line-of-Sight - visada direta entre dispositivos
L_d	Desvanecimento do sinal na dada distância de separação d
$L_s(d)$	fator de atenuação do sinal

MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
Ma	Massa do dispositivo
$NLOS$	Non-line-of-sight - sem visão direta
P	Posição de um alvo desconhecido dentro de um sistema de Eixo cartesiano (X, Y) .
P_K	Matriz de covariância do erro no Filtro de Kalman no instante (K)
P_T	Potência de Transmissão
$P_r(d)$	Potência recebida em uma distância d
RB	Redes Bayesianas
RF	Radiofrequência
$RFID$	Radio-Frequency Identification - Identificação por Radiofrequência
SVM	Support Vector Machine
ToA	Time-of-Arrival - Tempo de Recepção
UWB	Ultra Wide Band - Banda ultra larga
V_n	Variável de votos de deturpação para uma âncora n
$WKNN$	Weighted K Nearest Neighbours - PK vizinhos mais próximos Ponderados
X	Coordenada do eixo das abcissas em um eixo cartesiano.
X_{A_n}	Coordenada do eixo das abcissas de uma âncora n em um eixo cartesiano.
X_σ	Desvanecimento de pequena escala
Y	Coordenada do eixo das ordenadas em um eixo cartesiano.
Y_{A_n}	Coordenada do eixo das ordenadas de uma âncora n em um eixo cartesiano.
α	Fator de proporcionalidade
δt	Período de amostragem entre uma leitura anterior e atual
η	desvanecimento de larga escala do ambiente.
$\hat{X}_{(K)}$	Sinal de interesse no Filtro de Kalman
λ	Comprimento de onda do sinal propagado
θ_K	ângulo de orientação do usuário

a_d	Aceleração linear do eixo
c	Velocidade da luz
d	Distância
d_0	Distância de referência
d_{A_I}	Distância euclidiana de uma âncora (I) para a âncora de referência
$d_{A_n A_I}$	Distância euclidiana entre uma âncora avaliada (n) para uma âncora avaliadora (I)
d_{A_n}	Distância entre âncora avaliadora e dispositivo móvel
d_K	Distância percorrida por um passo
f	Frequência
g	Indicação da gravidade
i	indicação do eixo de leitura de um sensor, com $i = 0$ para indicação do eixo X , $i = 1$ para eixo Y e $i = 2$ para eixo Z
t	Duração relativa do sinal a qual o filtro estará atuando
u_K	transição das coordenadas do instante anterior para o atual
MAC	Media Access Control
MEMS	Microelectromechanical Systems - Sistemas Microeletromecânicos.
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
Wi-Fi	Wireless Fidelity - Tecnologia de comunicação registrada pela Wi-Fi Alliance

Capítulo 1

Introdução

Neste Capítulo introdutório são apresentadas características relativas a criação de sistemas de localização em ambientes internos (*indoor*). Desafios para implementação e projeto de sistemas de localização *Indoor*, motivações, objetivos e a organização do restante do documento são os principais pontos descritos neste Capítulo.

1.1 Sistemas de Localização

Ao longo dos últimos anos, com a evolução exponencial das tecnologias, diversas aplicações e serviços de localização que não eram factíveis de serem desenvolvidas tornaram-se realidade, por exemplo: marketing de precisão; rastreio global de pessoas, objetos e ativos; rotas de fugas em áreas críticas, entre outros (Malm 2017, YDOP 2017). Entre os avanços tecnológicos, é destacado o desenvolvimento de equipamentos móveis capazes de receber sinais de rádio, a exemplo dos smartphones, a qual permitiram a popularização de serviços como a localização de coordenadas geográficas.

Um exemplo de localização bastante difundida é aquela capaz de utilizar os Sistemas de Navegação Global por Satélites (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) (Kayton 2002). Uma aplicação típica com uso de GNSS em ambientes externos (*outdoors*) é o Sistema Global de Posicionamento (*Global Positioning System, - GPS*), um sistema desenvolvido inicialmente com objetivos militares (NASA 2017, Criscuolo et al. 2013, Misra & Enge 2006).

O GPS atualmente é uma ferramenta de grande importância para Serviços Baseados em Localizações (*Location Based Services - LBS*), fornecendo a posição geográfica de um usuário, expresso em função da latitude e longitude. A solução é baseada na distância estimada entre o receptor e um grupo de satélites espalhados ao redor do globo que atuam como referências (âncoras) do sistema (Criscuolo et al. 2013).

Um exemplo de uso diário de aplicações de localização são encontrados no *UBER* e *Waze*. Estes serviços utilizam os dados gerados pelo sistema GPS para encontrar a localização de um usuário e proporcionar benefícios de mobilidade. As aplicações fornecem informações e atividades para o usuário, tais como: rotas entre origem e destino; informações sobre o trânsito; rastreio de pessoas em serviços de caronas pagas, entre outros.

1.2 Sistemas de Localização *Indoor*

Um fato relevante a ser destacado no âmbito das soluções de localização é que a grande maioria das atividades humanas são realizadas dentro de construções. Soluções de localização tradicionais e baseadas em GPS apresentam baixo desempenho nos cenários de ambientes internos (*Indoor*) (Klepeis et al. 2001).

A principal razão para esse baixo desempenho está relacionado a existência de barreiras estruturais que dificultam a recepção dos sinais dos satélites pelo receptor, inviabilizando a estimação das coordenadas com uso do GPS (Makki et al. 2015). Um cenário típico é ilustrado na Figura 1.1, um dispositivo móvel não é capaz de estimar sua posição baseado em dados do GPS por não receber os sinais dos satélites do sistema.



Figura 1.1: GPS necessita de linha de visão direta entre o satélite e receptor, tornando resultados inadequados para ambientes *Indoor*.

Diversos esforços são gerados na produção de sistemas de localização em ambientes internos (*Indoor Location System - ILS*), proporcionando novas concepções que forneçam os serviços de geração de coordenadas *indoor* (Khalajmehrabadi et al. 2017, Correa et al. 2017). Em meio as propostas, os serviços utilizam da idealização da presença do usuário em cômodos de uma planta baixa ou a divisão do mapa local como um mapa cartesiano.

Em meio as propostas, uma característica importante na geração da coordenada é a introdução de novas referências no ambiente, a qual fazem papel semelhante as âncoras do sistema GPS. Em soluções tradicionais, também conhecidas como sistemas de localização baseados em redes, são substituídas as âncoras do sistema GPS por novos referenciais, normalmente associado a transmissores de sinais sem fio existentes no local e suas posições na planta baixa (Motter et al. 2011, Zhu et al. 2014, Peneda et al. 2009, Bahl & Padmanabhan 2000, Newman. 2014, Bolic et al. 2015, Lin et al. 2015).

Ao longo das variadas propostas, as coordenadas em ILS baseados em redes mudam de acordo com o uso do padrão tecnológico de transmissão utilizado e da formulação de localização, podendo ser utilizado critérios de proximidade de equipamentos,

formulações geométricas ou consulta de tabelas com intensidade dos sinais recebidos (Junsheng 2017, Correa et al. 2017). Entretanto, estes sistemas possuem problemas na precisão de seus resultados ocasionados por: ruídos derivados da interação dos sinais com barreiras estruturais; limitações tecnológicas de uso de canais de comunicação; custos de instalação.

Outra forma de estimar coordenadas está relacionada ao rastreamento da movimentação de um usuário. Neste grupo de propostas, o alvo tem seus trajetos rastreados por sensores inerciais, instalados normalmente em unidades de medição inercial (*Inertial Measurement Units* - IMU) (Correa et al. 2017, Junsheng 2017). Entretanto, as propostas deste grupo possuem como contrapartidas a precisão de seus sensores e a necessidade de conhecer um ponto inicial de referência. Mais detalhes sobre as variações dos grupos tradicionais de localização podem ser encontradas no Capítulo 2.

1.3 Motivação

Apesar de existirem muitas soluções na literatura (Zhu et al. 2014, Han et al. 2014, Newman. 2014, Radu & Marina 2013, Li et al. 2016, Motter et al. 2011, Bolic et al. 2015), o tema de localização *indoor* ainda é uma área aberta a novas propostas (Khalajmehrabadi et al. 2017). As lacunas sobre o tema de localização se mostram com base na não existência de um sistema robusto o suficiente para ser implementado em todos os tipos de construções, a exemplo de soluções que atendam hospitais e não atendem prédios comerciais.

Em geral, uma metodologia típica do problema de localização *indoor* tem início pela análise do cenário de instalação e instrumentação necessária (Junsheng 2017). Ambientes *indoor* comumente possuem em suas instalações equipamentos relacionados a transmissões de dados por redes sem fio, o que favorece o uso de sistemas de localização baseados em redes. Ao tratar de espalhamento de dispositivos, um cenário bastante promissor e em expansão são as instalações com Internet das Coisas (*Internet of Things*) - IoT (Al-Fuqaha et al. 2015). Em um típico cenário *IoT* será possível encontrar uma infraestrutura de comunicação confiável, contendo redes de transmissores e sensores sem fio e a integração de diversos serviços (Postscapes 2017), como ilustrado na Figura 1.2.

No que tange o espalhamento de dispositivos fixos em um ambiente, cria-se a possibilidade da substituição das estações de referências (âncoras -*Anchors*) do GPS, por equipamentos geradores de sinais de posição fixa, como exemplo dos Pontos de Acesso (*Access Point* - AP) do protocolo *IEEE 802.11*. Ao tratar dos dispositivos transmissores, uma localização *Indoor* poderá ser determinada por meio da posição conhecida do equipamento fixo no local e parâmetros de transmissão dos sinais.

Como foi relatado anteriormente, um sistema de localização baseado em redes possui problemáticas relacionadas ao comportamento do sinal em sua propagação pelo ambiente, o que introduz a necessidade de alguma estratégia de mitigação de deturpações. Uma forma de mitigar e otimizar resultados é o uso de um sistema de localização híbrido, capaz de usar duas ou mais técnicas simultaneamente, tecnologias e/ou metodologias para aferir bons resultados (Correa et al. 2017). Uma plataforma que concentra muitos trabalhos de sistemas de localização híbridos são os smartphones (Correa et al. 2017). Estes



Figura 1.2: Exemplo de ambiente de um Shopping, com serviços oferecidos pelos empreendimentos para possíveis clientes por meio da comunicação de transmissores e smartphones.

dispositivos tipicamente embarcam soluções de sensores inerciais, múltiplos protocolos de comunicação sem fio e componentes de geolocalização que podem ser combinados para criar um eficiente sistema de localização híbrido.

1.4 Objetivos

Diante de um cenário promissor, cria-se a motivação de gerar uma metodologia para uma ILS, capaz de estimar as coordenadas de um alvo em um ambiente *indoor*, com a menor margem de erro possível. Para tal, o objetivo do trabalho visa propor uma metodologia para uma ILS híbrida, capaz de ser utilizada em ambientes internos de grandes construções, como shopping centers e hospitais. Os ambientes devem constar de espalhamento de equipamentos para *IoT* já instalados no local, o que torna o ambiente propício para determinar a posição do usuário.

Assim, é visualizado o encontro da coordenada de um usuário em meio a uma planta baixa dividida em um plano cartesiano. A posição do alvo será estimada pelo porte de um dispositivo móvel, como um smartphone, do qual irá coletar durante uma margem de tempo as intensidades dos sinais de estações próximas, utilizando de pelo menos três transmissores de sinal sem fio (âncoras) já existentes no local e aplicado a um método de localização conhecido como trilateração. No local, diversos equipamentos transmissores podem ser utilizados como referenciais do sistema, com o qual são normalizados com base na distância destes para o dispositivo móvel, formando um sistema híbrido de âncoras. Neste trabalho será aplicado com uso de transmissores com padrões *Wi-Fi* e *Bluetooth Low Energy* - (*BLE*), bastante utilizados em dispositivos para *IoT* e capazes de se

comunicarem com um smartphone.

As coordenadas do alvo são refinadas com base na leitura de sua movimentação utilizando um sistema inercial para a tarefa. Com uso da ocorrência de movimento rastreada pelos sensores acelerômetro e magnetômetro, existentes no dispositivo, é atualizado a coordenada do alvo com base no deslocamento de um passo humano e sua referência ao polo norte magnético do planeta, com o sistema de coordenadas atualizado por meio do método de navegação conhecido como *Pedestrian Dead Reckoning*.

A interpolação entre dados de sistemas diferentes (redes e inercial) ocorrerá com uso de uma ferramenta conhecida como Filtro de Kalman, que tem a capacidade de combinar dados de um sistema dinâmico como *Pedestrian Dead Reckoning*, com dados de um estado observado como a trilateração, formando assim uma coordenada híbrida baseada nos em duas fontes diferentes. Portanto, o sistema gerado utiliza de um sistema de âncoras híbridas para gerar a posição do usuário e terá resultados refinados com uso de um sistema inercial, gerando com uso do Filtro de Kalman, a coordenada híbrida que representa a posição do usuário na planta baixa da construção.

1.5 Organização do trabalho

O restante do trabalho é dividido da seguinte forma:

- Capítulo 2 aborda trabalhos e sistemas relacionados ao tema;
- Capítulo 3 descreve uma revisão teórica sobre sistemas de localização e as ferramentas envolvidas;
- Capítulo 4 descreve a metodologia proposta no trabalho;
- Capítulo 5 discute os cenários de avaliação, resultados apresentados e a factibilidade de implementação da proposta;
- Capítulo 6 discute as conclusões do trabalho e indica direções para estudos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos relacionados

A geração de coordenadas em um ambiente *indoor* é uma tarefa complexa, capaz de envolver diversas variáveis ligadas as estruturas, sensores e tecnologias de comunicações utilizadas (Makki et al. 2015). Assim, nesse Capítulo são abordados alguns sistemas e metodologias encontrados na literatura sobre a problemática de localização *Indoor*.

Nos últimos anos, diversos esforços foram gerados para propor novas soluções para localização *indoor*, proporcionando metodologias voltadas a estimacões mais precisas das coordenadas (Correa et al. 2017, Junsheng 2017). Em uma busca histórica, são datados trabalhos para localização *Indoor* desde 2000 (Bahl & Padmanabhan 2000).

Uma forma mais didática para facilitar o entendimento da problemática de localização *indoor* é classificar as diferentes soluções em grupos similares baseado em determinadas características. Nesse trabalho iremos adotar a proposta de classificação sugerida por Correa et al. (2017), onde as variadas propostas de metodologias para o problema de localização *indoor* foram classificados em três grupos:

- **Sistemas Baseados em Redes (*Network Based Systems*)**: são sistemas que utilizam de tecnologias de transmissão sem fio e seus parâmetros para a estimacão da posição do usuário;
- **Sistemas Inerciais (*Inertial Based Systems*)**: também chamado de Sistema de navegação terrestre, utilizam de sensores inerciais para realizar uma auto-estimacão de coordenadas, sem dependência da infraestrutura;
- **Sistemas Híbridos (*Hybrid systems*)**: sistemas criados baseados em duas ou mais tecnologias ou métodos diferentes.

2.1 Sistemas Baseados em Redes

Ao tratar inicialmente de sistemas de localização baseados em redes, diversos trabalhos abordam sobre os vários sistemas de comunicação existentes dentro das construções ao longo do mundo. Devido a popularidade do padrão de comunicação no mercado, tipicamente são encontrados trabalhos baseados em redes com tecnologia *Wi-Fi* (Junsheng 2017, Khalajmehrabadi et al. 2017). Existem também referências que adotam redes de sensores sem fio, com uso de tecnologias de *Beacons* do *Bluetooth 4.0* e dispositivos em *Ultra Wide Band* (UWB).

De acordo com Mao et al. (2007) e Zhu et al. (2014), as metodologias baseadas em redes utilizam parâmetros de sinais de rádio para estimar as posições e podem ser divididas em dois subgrupos, sendo: métodos baseados em alcance fixo (*Range Based*) e métodos baseados em alcance livre (*Range Free*).

2.1.1 Métodos baseados em alcance fixo

Neste grupo, os sistemas utilizam um modelo matemático para determinar a distância entre dispositivos. Por conseguinte, são utilizados de referências associadas a princípios matemáticos para determinar o posicionamento do usuário, como a lateração.

No princípio da lateração, costuma-se realizar inicialmente uma estimativa de distância entre o dispositivo móvel e dispositivos de referência (âncoras). A estimativa da posição do usuário será um ponto em comum entre raios formados a partir dos pontos de referência.

A distância entre dispositivos pode também ser determinada com uso do Tempo de Recepção (*Time of Arrival* - TOA) de sinais entre dispositivos (Sakpere et al. 2017). O dispositivo móvel recebe os sinais das âncoras e determina sua posição por base no ângulo de incidência (*Angle-of-Arrival* - AoA) entre estações, como pode ser observado na Figura 2.1. As técnicas TOA e AOA foram também utilizadas em Dotlic et al. (2017), porém adotando como base o padrão de comunicação UWB. Devido a grande largura de banda de transmissão, a utilização do UWB permite a solução de localização ter uma melhor precisão. Uma problemática relacionada ao uso do TOA é a necessidade de uma grande banda de transmissão disponível e sincronização dos relógios. Pequenos erros relacionados ao tempo podem comprometer o resultado com uma média de 0,3 metros por nanosegundo (Makki et al. 2015). Tal ponto costuma indicar uma necessidade de hardware dedicado para a função, o que encarece o projeto (Makki et al. 2015).

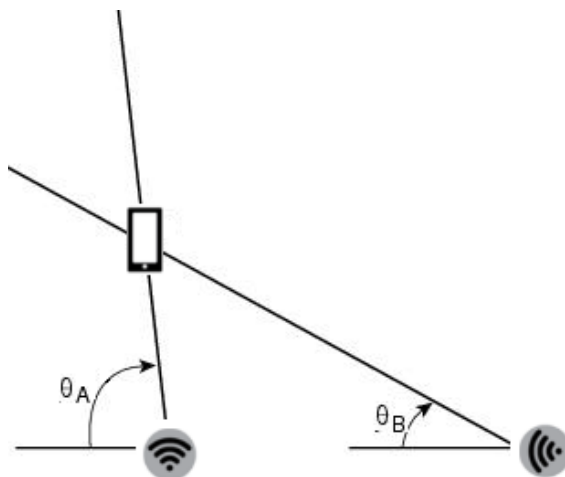


Figura 2.1: Aferimento de coordenadas por meio de AoA.

Outros trabalhos com uso de lateração também podem ser encontrados baseados na Indicação de Intensidade de Sinais Recebidos (*Received Signal Strength Indicator* - RSSI),

como em Motter et al. (2011) e Zhu et al. (2014). Os autores utilizam a RSSI de dispositivos *WirelessHART* para estimar a distância entre equipamentos, e uso do sistema de posicionamento conhecido como trilateração. A trilateração determina a posição do usuário (P) como a intersecção entre circunferências centralizadas entre três estações envolvidas (Peneda et al. 2009, Rusli et al. 2016). Um exemplo dessa técnica é ilustrado na Figura 2.2.

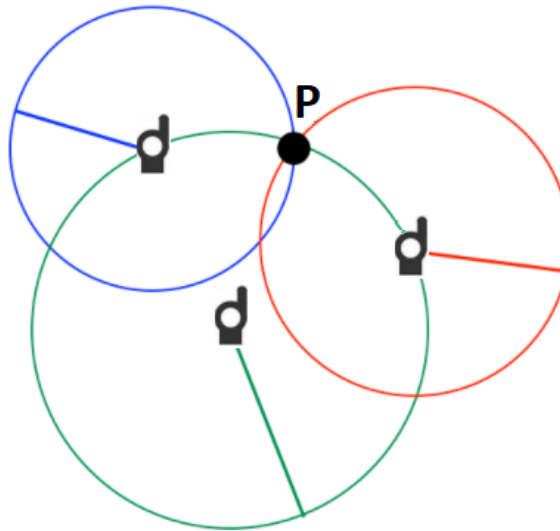


Figura 2.2: Exemplo de aferimento de coordenadas por trilateração.

Entretanto, os sinais propagados no ambiente interagem com as estruturas existentes no local, envolvendo situações onde algum corpo denso bloqueia a visão direta entre dois dispositivos. A situação de bloqueio interfere no comportamento do sinal, mudando a direção deste para um novo sentido e aumentando o tempo de transmissão ou diminuindo sua intensidade (Sklar 2001). Essa alteração dos parâmetros mencionados introduz os ruídos que proporcionam erros na estimação da distância entre dispositivos, deturpando os resultados nos sistemas de localização baseados em alcance fixo. Os erros existentes na definição de distância ocasiona a necessidade de criação de estratégias de correção do parâmetro.

2.1.2 Métodos baseados em alcance livre

Neste grupo, as metodologias não estão ligadas a modelos matemáticos de posicionamento. O posicionamento é aferido por meio de uma interpretação dos parâmetros de transmissão junto as dimensões do ambiente. Dois princípios de posicionamento da metodologia de alcance livre são: *fingerprint* e proximidade (*Proximity*).

Um dos primeiros trabalhos sobre localização é o de Bahl & Padmanabhan (2000), que utiliza do método *Fingerprint*. O método utiliza de espalhamento de dispositivos *Wi-Fi* pelo ambiente, e utiliza da RSSI das estações para determinar a localização. O método possui duas fases, na primeira, chamada fase *offline*, é criado um mapeamento de intensidade dos sinais recebidos ao longo do ambiente, separando toda a área de cobertura

em *clusters* (Khalajmehrabadi et al. 2017), com o agrupamento de *clusters* chamado de *fingerprint*. Um exemplo de 3 *clusters* na criação de uma *fingerprint* pode ser observado na Figura 2.3, que é uma área de 100 x 100 metros e 5 estações. Na segunda fase, chamada fase *Online*, é coletada a RSSI de todas as redes alcançáveis. Então, a informação coletada é associada a um dos *clusters* por meio de um método determinístico. Em Bahl & Padmanabhan (2000), foi utilizado *K Nearest Neighbours* (kNN) para determinar o posicionamento do usuário. Um dos problemas do método é a necessidade de um poder computacional mais elevado.

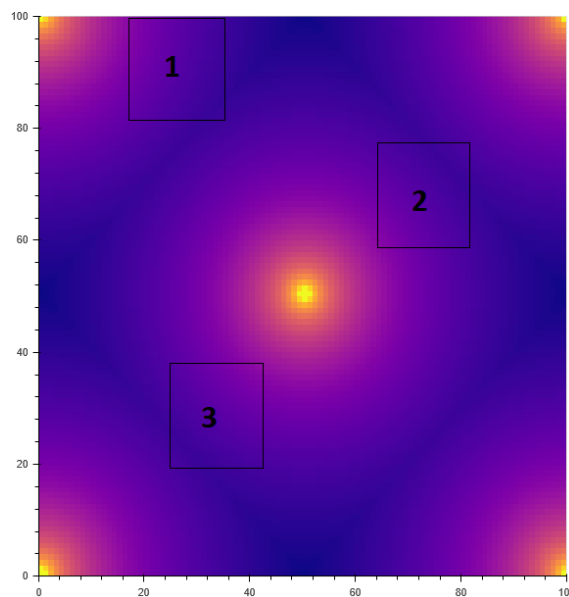


Figura 2.3: Na criação de uma *fingerprint* são criados *clusters* de RSSI de um ambiente.

Alguns trabalhos utilizam outros método para determinar a posição do usuário pelo mapa, como em Han et al. (2014), que utiliza um sistema de pesos (*weighted*) no KNN (WKNN). Em outros trabalhos, utilizam-se métodos com maiores complexidades computacionais para conquistar um menor erro de estimação. Um exemplo de trabalho com *fingerprint* é encontrado em Wu et al. (2004), que utiliza de *Support Vector Machines* (SVM) para aferir a coordenada do mapa com mais precisão. Outro trabalho com aumento de processamento para aferir melhores resultados é o de Nuño-Barrau & Páez-Borralló (2006) com utilização de Análises de Discriminações Lineares (ADL). Outros trabalhos utilizam de classificação probabilística para associação das RSSI a *fingerprint*, como em Madigan et al. (2005), que utilizou de Redes Bayesianas (RB).

Apesar de indicar boa precisão, o método *fingerprint* requer muitos esforços para a criação e manutenção do mapa, principalmente para mapas com grandes níveis de granularidades (Khalajmehrabadi et al. 2017). A recalibração do mapa é relacionada a mudanças de configurações estruturais no ambiente. Algumas técnicas sobre métodos para criar diferentes variações dos mapas podem ser encontrados em Khalajmehrabadi et al. (2017) e Dil & Havinga (2010), e sobre a calibração em Hossain & Soh (2015).

Outras soluções são aquelas baseadas em métodos de proximidade, as quais baseiam-se na localização por zonas, identificando a localização por existência no ambiente ou

aproximação do usuário de uma âncora (Junsheng 2017). Um exemplo é o *iBeacon* (Newman. 2014), com identificação do quão distante está o usuário de uma âncora de referência. Em Harter et al. (2002), um dos primeiros trabalhos sobre localização, é utilizado um esquema de *active badges* e vários sensores infravermelho espalhados pela instalação. Uma outra aplicação do método de proximidade pode ser encontrado em Lin et al. (2015), onde os autores utilizam informações da RSSI de estações *BLE* para rastrear pacientes. Em Bolic et al. (2015) foi descrito um trabalho que utiliza Identificação por radiofrequência (*Radio-Frequency Identification* - RFID). As limitações do método de proximidade estão relacionadas ao alcance da tecnologia utilizada e associação da RSSI a zona.

2.2 Sistemas Inerciais

Neste grupo, o dispositivo deverá ser capaz de encontrar suas coordenadas sem depender de infraestrutura do ambiente (Correa et al. 2017). Atualmente, os sistemas utilizam unidades de medição inercial (*Inertial Measurement Units* - IMU), formado por sensores de 3 eixos: acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. O sistema utiliza dos sensores para determinar a ocorrência de movimento do usuário, atualizando a coordenada atual do usuário, que parte de um ponto conhecido para a nova posição. Um método bastante empregado na literatura para essa operação é o Pedestrian Dead Reckoning (PDR), com o método de atualização das coordenadas do alvo pedestre baseado em um sistema de navegação marítima. Para isso, é utilizado de um sistema de ocorrência de movimento e direção em conjunto com a determinação de quantidade de deslocamento realizado.

Com uso dos sensores, pode ser determinado a movimentação e sentido do usuário na construção, desde que seja conhecida a coordenada inicial do alvo. Na literatura são encontradas algumas exemplificações de trabalhos com uso de sistemas inerciais, como em Kang & Han (2015), com aplicação de um sistema de navegação com contador de passos por uso de sensores de aceleração linear e de orientação, onde o usuário portava um *smartphone* na mão, como ilustrado na Figura 2.4. Em Munoz Diaz (2015), os autores aplicaram um sistema de navegação com uma detecção de passos usando o giroscópio, com o dispositivo estando localizado em bolso de uma calça. O trabalho demonstra um sistema alternativo de detecção de passos baseado na variação da velocidade angular. O método resulta em erros menores que os métodos com uso de aceleração linear. Um comparativo de operação entre os diferentes sistemas com uso de sensores inerciais, pode ser encontrado em Jimenez et al. (2009).

Os sistemas inerciais tendem a resultar em estimações mais precisas se comparadas aos sistemas baseados em redes, mas necessitam do conhecimento de uma posição inicial do usuário. Além dessa pontuação, as coordenadas estimadas por sistemas inerciais são afetados por erros associados a sensibilidade dos seus sensores, assim gerando leituras que resultam em erros crescentes, a qual fornecem distanciamento da coordenada real do usuário para a coordenada estimada pelo sistema. Em conjunto, o método necessita de uma forma de estimação da distância percorrida, a qual pode variar de acordo com a altura do usuário.

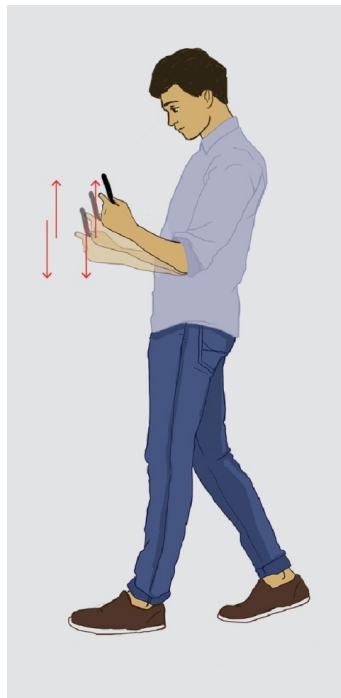


Figura 2.4: Rastreo da ocorrência de movimento pela oscilação da mão do usuário.

2.3 Sistemas híbridos

Sistemas híbridos são compostos pela combinação de dois ou mais métodos, com o objetivo de combinar as vantagens entre metodologias ou tecnologias. A fusão dos dados é atrelada por meio de técnicas de interpolação na combinação de métodos.

Um dos primeiros sistemas híbridos de localização híbrida foi desenvolvido para aprimorar resultados do GPS. Neste desenvolvimento ocorre o rastreo da movimentação de pedestres para ser utilizado em casos quando o GPS não estivesse ativo (Tarrío et al. 2013). Entretanto, o uso de GPS não se mostra confiável em ambientes internos, o que leva a inviabilidade da aplicação para estes cenários (Makki et al. 2015).

Como um sistema formado por combinação de métodos, as possibilidades são diversas. Entretanto, algumas combinações não se tornam interessantes, por utilizar de muita infraestrutura extra ou situações específicas, como ambientes fechados. Um exemplo é o trabalho de Ruiz et al. (2012), com a combinação do uso da intensidade de sinais recebido de RFID com sensores inerciais por meio da versão Estendida do Filtro de Kalman.

Ao longo dos trabalhos encontrados na literatura, como é destacado em Correa et al. (2017), normalmente os sistemas de localização híbridos são embarcados em smartphones, devido ao multi-sensoriamento do dispositivo, custo e sua popularidade no mercado. Como em Röbesaat et al. (2017), os autores demonstraram um sistema híbrido de localização, baseado no princípio de trilateração com uso de níveis de RSSI proveniente de estações BLE e dados inerciais. Em Frank et al. (2009), foi utilizada uma combinação entre *Fingerprint* com *Wi-Fi* e um sistema inercial, utilizando uma versão Estendida do Filtro de Kalman para a fusão. Outro trabalho com interação entre *Fingerprint* e sistema

inercial é encontrado em Radu & Marina (2013), diferente de outras soluções, os autores utilizam uma técnica de interpolação por meio de Filtro de Partículas para fundir os dados de interpolação. Outros trabalhos combinam o uso da variação do campo magnético, a ser coletada pelo magnetômetro, com outros sensores, como em Li et al. (2016), que utilizou a combinação *fingerprint Wi-Fi* e *fingerprint* magnético com sistemas de navegação inercial.

2.4 Número de Âncoras

Um detalhe relacionado a precisão dos métodos que utilizam sistemas baseados em RSSI é relativo ao número de âncoras no ambiente. Um maior número de âncoras indica uma possibilidade de menor distância entre dispositivo móvel e dispositivo fixo, além de estar relacionado com a área de cobertura do sistema na instalação. Entretanto, como pode ser encontrado em Chan et al. (2010), o aumento de âncoras pode aumentar a interferência nos canais de comunicação, prejudicando a aferição das coordenadas. Portanto, será necessário um espalhamento mais adequado das estações e limitar o quantitativo de dispositivos na área da implementação.

Alguns trabalhos destacados anteriormente demonstram o número de âncoras utilizadas e dimensões das áreas de testes em suas implementações. A Tabela 2.1 descreve um quantitativo de “âncoras x área” de alguns trabalhos. Casos com uma visada direta entre dispositivos fornecem melhores resultados (Röbesaat et al. 2017). Portanto, um espalhamento adequado das âncoras tenderá a diminuir os erros na definição das coordenadas.

Tabela 2.1: Relação de âncoras e área destacadas em alguns trabalhos.

Autor	Nº de âncoras	Área (m^2)
Motter et al. (2011)	4	54
Zhu et al. (2014)	8	917,4
Peneda et al. (2009)	7	-
Rusli et al. (2016)	3	30
Bahl & Padmanabhan (2000)	3	980
Han et al. (2014)	3400	192.200
Wu et al. (2004)	21	1700
Harter et al. (2002)	100	280
Lin et al. (2015)	12	300
Bolic et al. (2015)	24	8
Röbesaat et al. (2017)	8	-
Frank et al. (2009)	11	-
Ruiz et al. (2012)	71	2200

2.5 Discussões

Baseado no que foi discutido durante a Seção 2, os sistemas híbridos tendem a melhorar resultados, proporcionando uma solução de localização *indoor* mais robusta. Não só como melhoria de resultados, mas os sistemas híbridos fornecem uma maior gama de possibilidades, variando com o uso de tecnologias de transmissão ou com técnicas utilizadas. Na Tabela 2.2, é demonstrado o registro dos trabalhos apresentados nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, onde se é observado a variação dos trabalhos de acordo com a tecnologias empregadas, parâmetros utilizados e sistema de posicionamento.

Sistemas híbridos revelam lacunas para o projeto de sistemas de localização, tornando possível a geração de novas metodologias. Uma característica pouco explorada nos trabalhos relatados é referente aos cenários com interação entre dispositivos de padrões de transmissão sem fio diferentes, como em cenários com dispositivos IoT (Postscapes 2017, Khan et al. 2012). Diversidade de dispositivos aumenta a potencialidade de âncoras para o sistema, e a já existência destes no ambiente reduzem o custo infraestrutural de implementação. Tal cenário ganha potencial com implementação de dispositivos sinalizadores, que atuam com informações do ambiente para monitoramento ou comunicação dos dispositivos (Newman. 2014).

Entretanto, a diversidade de protocolos de comunicação coexistentes no ambiente revelará particularidades na transmissão dos sinais, a qual exigirá uma abordagem mais detalhada para interação do método com cada dispositivo. Ao utilizar parâmetros de transmissão de sinais, será necessário utilizar um método para gerar a primeira coordenada. Como destacado ao longo do Capítulo, um método baseado em redes pouco utilizado em soluções híbridas é a trilateração, em comparação a escolha do *fingerprint*, pelo ponto de resultar em melhor precisão em relação aos outros métodos. Entretanto, *fingerprint* possui o esforço de criação e manutenção do mapa de RSSI (Khalajmehrabadi et al. 2017), o que gera uma complexidade operacional. A escolha no projeto será utilizar de trilateração como primeiro sistema para hibridização, o que irá requerer uma estratégia de contornar erros ocasionados pelos ruídos.

Uma forma de combinar (hibridizar) a trilateração será com adição do sistema inercial. A combinação dos métodos necessita de um interpolador, e entre os métodos sugeridos na literatura, está o uso do Filtro de Kalman, que introduz um método eficiente e de processo computacional simplificado comparado a outros métodos. Com base no que foi relatado, será explorado nesse trabalho uma metodologia para uso em ILS móveis, baseado em:

- Capacidade de interação com diversos padrões de comunicação;
- Informação da localização baseada em sensores inerciais, trilateração (baseada em RSSI) e estações pertencentes a uma diversidade de protocolos de comunicação;
- Para aferir melhores resultados na trilateração, será feita uma estratégia de determinação e correção de distância entre dispositivos;
- Coletar dados durante um período de tempo, utilizando o conjunto de amostras dos métodos para auxiliar na retirada de ruídos;
- Fusão de coordenadas da trilateração e sistemas inerciais por Filtro de Kalman.

Em meio aos trabalhos citados, um que utiliza a visualização de combinação de trilateração com sistemas inerciais é a proposta de Røbesaat et al. (2017). No trabalho do

Tabela 2.2: Relação dos trabalhos destacados nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, com foco em: tecnologia empregada; parâmetro do sinal utilizado; princípio de posicionamento.

Autor	Tecnologia	Parâmetro	Posicionamento
Dotlic et al. (2017)	UWB	Tempo	AoA
Motter et al. (2011)	<i>WirelessHART</i>	RSSI	Trilateração
Zhu et al. (2014)	<i>WirelessHART</i>	RSSI	Trilateração
Peneda et al. (2009)	<i>ZigBee</i>	RSSI	Trilateração
Rusli et al. (2016)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	Trilateração
Bahl & Padmanabhan (2000)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	<i>Fingerprint</i> (KNN)
Han et al. (2014)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	<i>Fingerprint</i> (WKNN)
Wu et al. (2004)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	<i>Fingerprint</i> (SVM)
Nuño-Barrau & Páez-Borrillo (2006)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	<i>Fingerprint</i> (ADL)
Madigan et al. (2005)	<i>Wi-Fi</i>	RSSI	<i>Fingerprint</i> (RB)
Newman. (2014)	BLE	RSSI	<i>Proximidade</i>
Harter et al. (2002)	Infravermelho	-	<i>Proximidade</i>
Lin et al. (2015)	BLE	RSSI	<i>Proximidade</i>
Bolic et al. (2015)	RFID	RSSI	<i>Proximidade</i>
Kang & Han (2015)	IMU	-	Navegação
Munoz Diaz (2015)	IMU	-	Navegação
Röbesaat et al. (2017)	BLE + IMU	RSSI	Trilateração + Navegação
Frank et al. (2009)	<i>Wi-Fi</i> + IMU	RSSI	<i>Fingerprint</i> + Navegação
Radu & Marina (2013)	<i>Wi-Fi</i> + IMU	RSSI	<i>Fingerprint</i> + Navegação
Li et al. (2016)	<i>Wi-Fi</i> + IMU	RSSI + Magnético	<i>Fingerprint</i> + Navegação
Ruiz et al. (2012)	RFID + IMU	RSSI	<i>Proximidade</i> + Navegação

autor, é utilizado a combinação de uma trilateração baseada em RSSI de âncoras *BLE* em combinação com método PDR utilizando o Filtro de Kalman, fornecendo coordenada a cada ocorrência de um passo. No método da trilateração, o autor padroniza os parâmetros

de desvanecimento de larga escala para todas as âncoras, determinado por sua metodologia. Outro ajuste feito na etapa da trilateração é a correção de medições de RSSI com uso do Filtro de Kalman. O método PDR, ocorre com atualização por meio do uso do acelerômetro para rastrear a movimentação do alvo, com porte do dispositivo na mão do usuário. No que se difere do autor citado, a metodologia proposta neste trabalho visará a coleta de dados em um tempo de 5 segundos e com o uso de um sistema híbrido de âncoras (*BLE* e *Wi-Fi*), com estimação do parâmetro do modelo de desvanecimento do sinal e potência de referência para cada âncora. Em conjunto, é adicionando um sistema de correção da distância entre estações para que ao final, seja aplicado a trilateração. O Filtro de Kalman é utilizado apenas ao final dos 5 segundos, fornecendo assim a coordenada híbrida.

Portanto, o trabalho a ser proposto será uma metodologia híbrida capaz de utilizar dois sistemas diferentes para determinar uma coordenada mais confiável, seguindo como a visualização da Figura 2.5. Com utilização da RSSI de estações *Wi-Fi* e *BLE* para estimação de coordenadas na trilateração, associado as coordenadas geradas por sensores inerciais e fusão de dados por meio de Filtro de Kalman.

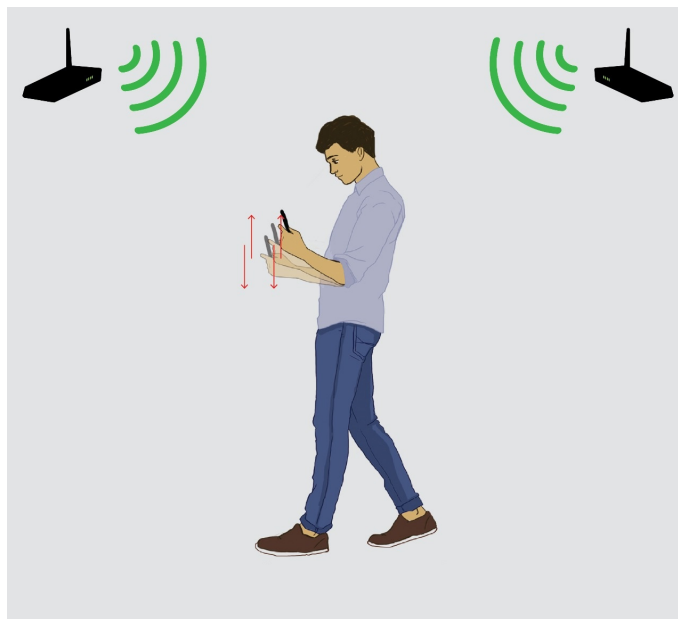


Figura 2.5: Estimação de coordenada híbrida com base na combinação de coordenadas de um sistema baseado em redes e um sistema inercial.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

Neste Capítulo, é relatada a fundamentação teórica necessária para a análise e implementação da proposta deste trabalho. Como descrito na Seção 2.5, nesse trabalho serão geradas coordenadas por dois métodos diferentes: sistemas baseados em redes com uso da trilateração utilizando RSSI e sistemas inerciais por meio de uma solução PDR baseado em acelerômetro e magnetômetro. Ao final, o método irá utilizar de um interpolador para combinar ambos os sistemas, sendo adotado o Filtro de Kalman para a tarefa.

Portanto, ao longo deste Capítulo é realizada uma revisão sobre as técnicas necessárias para aplicação da metodologia, bem como análise das deturpações de dados associados a cada sistema.

3.1 Propagação de sinais e a distância entre dispositivos

Em um típico sistema de localização *indoor* baseado em redes, um dos primeiros parâmetros necessários para gerar o posicionamento de um usuário é a distância entre a estação móvel e estações fixas (âncoras). A distância entre dispositivos pode ser determinada pela propagação dos sinais emitidos. Um sinal emitido por uma estação é uma onda eletromagnética que será propagada em um ambiente por meios não guiados. A emissão do sinal ocorre por meio de uma antena associada ao dispositivo eletrônico, com a transmissão ocorrendo de forma direcional ou omnidirecional (Bezerra 2017).

Dispositivos com antenas direcionais focalizam a energia do sinal de Radiofrequência (RF) em uma direção específica. A área de cobertura do dispositivo é referente ao ganho de sua antena, mas o ângulo eficaz da cobertura é inversamente proporcional a diretividade da antena (CISCO 2007). Entretanto, as antenas omnidirecionais estão presentes em grande parte dos dispositivos transmissores em ambientes *indoor*, com a característica de irradiação dos sinais para todas as direções (Morimoto 2008).

Após a emissão, os sinais são propagados pelo ambiente, seguindo por uma atenuação de sua intensidade a medida que se afastam de sua fonte geradora. Assim, a distância entre dispositivos pode ser determinada por uma estimativa baseada no desvanecimento do sinal a medida que se desloca pelo ambiente.

Entretanto, os sinais irão interagir com estruturas, o qual implicará na modificação de suas características até que sejam recebidos por um receptor, o que requer algumas medidas de observação do seu comportamento. Portanto, ao longo das próximas seções,

são fornecidos detalhes sobre a propagação de sinais, descrevendo o desvanecimento dos sinais no ambiente e a definição da distância entre dispositivos que utilizam antenas omnidirecionais.

3.1.1 Propagação de sinais

Durante a comunicação entre dispositivos, sinais contendo informações são propagados pelo ambiente em forma de ondas eletromagnéticas. Ao serem transmitidos por uma antena, os sinais possuem uma potência de transmissão (expressa em dBm) e diminuem sua intensidade a medida que se deslocam pelo ambiente. Até alcançar o receptor, os sinais têm sua atenuação ocasionada por um parâmetro de degradação, conhecido como perda de percurso (*path loss*) ou perda no espaço livre (*free space loss*) (Sklar 2001). Tal fator pode ser modelado no espaço livre por meio de uma antena isotrópica, como segue na Equação:

$$L_s(d) = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), tem-se as seguintes definições:

- d como a distância entre transmissor e receptor;
- λ é o comprimento de onda do sinal propagado;
- $L_s(d)$ o fator de atenuação do sinal.

O comprimento de onda pode ser determinado com base na frequência do sinal (f) e na velocidade da luz (c), como segue na Equação:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

Com base na formulação do desvanecimento de um sinal ao percorrer uma dada distância, é possível determinar a potência de recepção do sinal no final desse deslocamento, como uma subtração da potência perdida a partir da potência de transmissão. Entretanto, ao tratar de cenários reais, em especial ambientes *indoor*, a formulação da Equação (3.1) se mostra incompleta. Tal ponto se deve a proximidade dos dispositivos e dos sinais ao solo e contato com outras estruturas presentes no ambiente (Rappaport 2001).

Adicionalmente, ao tratar em especial de um cenário *indoor*, uma comunicação entre dispositivos podem ocorrer de duas formas, sendo a primeira delas o caso de linha de visão direta (*Line-of-Sight* - LOS) entre equipamentos. A outra forma é com existência de estruturas entre os dispositivos, ocasionando a visualização indireta (*Non-line-of-sight* - NLOS) entre os equipamentos (Wei et al. 2005). Um exemplo dos dois casos pode ser visualizado na Figura 3.1.

A ocorrência de NLOS implica na mudança da direção parcial ou total do deslocamento do sinal ao ter contato com uma barreira, induzindo a possibilidade do sinal percorrer múltiplos percursos (*multipath*) até seu destino (Rappaport 2001). Como indicado por Sklar (2001), a ocorrência de múltiplos percursos ocorrem em função de quatro mecanismos de interação entre um sinal e um corpo denso:

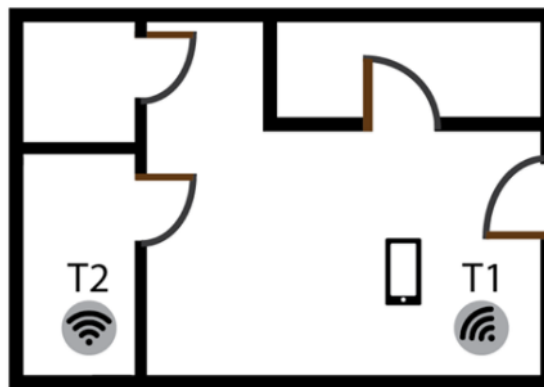


Figura 3.1: T2 está em *NLOS* com o *Smartphone*, enquanto T1 está em *LOS*.

- Reflexão: ocorre quando a onda eletromagnética incide sobre um obstáculo de proporções maiores que o comprimento da onda (λ), que reflete o sinal na direção contrária, não ocorrendo absorção do sinal em várias direções ou no sentido contrário a direção original de seu deslocamento. Nesse caso, pode haver ou não penetração de parte do sinal, dependendo da constituição da superfície refletora, que pode ser classificada em especular e difusa. Nos especulares o sinal retornar em uma única direção. Enquanto nos casos difusos o sinal poderá retornar em diversas direções possíveis, não só a direção original.
- Difração: ocorre quando o sinal interage com uma obstrução de corpo denso, de proporções relativas ao comprimento da onda (λ). Tal interação induz a formação de ondas secundárias, proporcionando novas rotas e uma área de cobertura não alcançada pela rota original. O termo sombreamento (*shadowing*) surge quando o campo de difração faz com que um sinal possa chegar ao destino ultrapassando um obstáculo, com este corpo denso sendo uma barreira impenetrável;
- Espalhamento: quando o sinal incide sobre um objeto com dimensões de mesma ordem ou menores que o comprimento de onda (λ) do sinal, ocorre a atenuação no sinal e reflexão do mesmo em diversas direções, espalhando a energia do sinal em forma de reflexão.

De base na explanação, intui-se que um modelo de propagação que descreva o comportamento do sinal, e auxilie na estimação da distância, deve levar em conta a influência de duas manifestações de desvanecimento de um sinal, sendo estas:

- Desvanecimento de larga escala (*large-scale fading*);
- Desvanecimento de pequena escala (*small-scale fading*).

O desvanecimento de larga escala representa a média de intensidade do sinal ao se deslocar pelo ambiente. Nesta, a intensidade do sinal decresce de forma logarítmica a medida que se afasta de sua fonte, sendo também portanto chamado de desvanecimento lento. Enquanto que o desvanecimento de pequena escala indica as oscilações rápidas e dramáticas na amplitude e fase do sinal, ocasionadas pelas mudanças espaciais entre transmissor e emissor (Sklar 2001). Em casos de múltiplos percursos, o desvanecimento

de pequena escala também pode ser chamado de desvanecimento de Rayleigh (*Rayleigh fading*) ou desvanecimento rápido (Sklar 2001). O desvanecimento rápido ou de pequena escala é causado por reflexões e/ou refrações de uma onda transmitida ao interagir com uma barreira, onde são os sinais refletidos e chegam ao receptor em tempos diferentes, gerando flutuações nos níveis de amplitude e fase do sinal.

Ao tratar de um receptor móvel portado por um usuário em ambientes *indoor*, tipicamente ocorrem casos de NLOS entre transmissor e receptor. Tal evento ocorre principalmente em função das estruturas locais da instalação ou do próprio corpo do usuário (Röbesaat et al. 2017, Sklar 2001). O que ocasiona na propagação do sinal do transmissor por caminhos alternativos até chegar ao receptor móvel, ou seja, o sinal chega por múltiplos percursos diferentes até seu destino, superando algum tipo de barreira existente entre os dispositivos.

A partir das descrições sobre a propagação e desvanecer dos sinais em um ambiente, a distância entre transmissor e receptor pode ser estimada com base no modelo de propagação do sinal. Na próxima Seção, é discutido o modelo de propagação de sinais Log-Distância, a ser utilizado na definição de distância entre estações.

3.1.2 Modelo de propagação Log-Distância

Como detalhado anteriormente, a intensidade de um sinal varia ao longo de sua propagação pelo ambiente. Um modelo encontrado na literatura que representa o comportamento da propagação de um sinal é o Log-Distância (Paoli 2016). O modelo destaca que a potência do sinal desvanece durante sua propagação em escala logarítmica, a medida que o sinal se afasta do dispositivo que o originou. O modelo é descrito por:

$$L(d) = L(d_0) + 10.\eta.\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.3)$$

Sendo identificados:

- d representando a distância entre transmissor e receptor;
- d_0 é uma distância de referência, normalmente 1 metro (Zhu et al. 2014);
- $L(d)$ indica a atenuação do sinal a uma dada distância d ;
- $L(d_0)$ é a atenuação do sinal a uma distância de referência, sendo determinada pela Equação (3.1) (Sklar 2001);
- η fornece a variável de desvanecimento de larga escala do ambiente, normalmente utilizado na literatura com valor igual a 2, para cenários em casos de LOS em espaço livre (Sklar 2001).

A partir dos valores dos parâmetros da Equação (3.3), é possível determinar a potência recebida a uma dada distância d com base na seguinte Equação:

$$P_r(d) = P_T - L(d) \quad (3.4)$$

Em que:

- $P_r(d)$ a potência recebida a uma distância d ;

- P_T a potência de transmissão;
- $L(d)$ o desvanecimento do sinal na distância de separação d .

Na Figura 3.2, é ilustrado um exemplo de propagação de um sinal seguindo o modelo Log-distância, descrito na Equação (3.3).

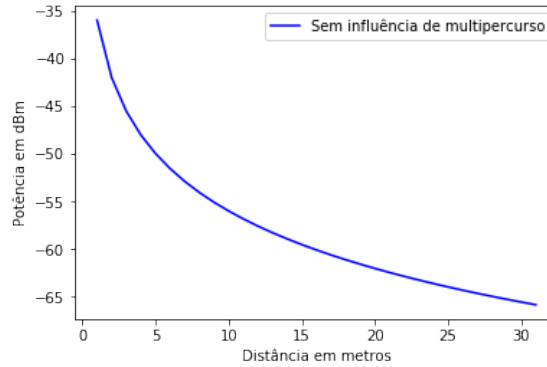


Figura 3.2: Nível de intensidade de um sinal ao longo da propagação, com $\eta = 2$.

Entretanto, neste trabalho o ambiente a ser considerado será um cenário *indoor*, com diversas barreiras físicas, gerando situações NLOS. Como dito anteriormente, tal cenário adiciona mudanças no modelo de potência proporcionadas pelos desvanecimentos rápidos e lentos do sinal. Para tratar dos múltiplos percursos (*multipath*) de um sinal e o sombreamento de estruturas, é incluído a Equação (3.3) a variável X_σ . A variável modela o comportamento de uma variável aleatória gaussiana de média zero e desvio padrão σ (Sklar 2001, Gomes et al. 2013). Logo, a Equação (3.3) é reformulada se tornando um modelo mais indicado para medições descorrelacionadas, sendo dada por:

$$L(d) = L(d_0) + 10\eta \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.5)$$

X_σ representa variações na intensidade do sinal causadas pela localização espacial do receptor, indicando um comportamento aleatório em $L(d)$ (Sklar 2001). Então, para uma modelagem mais adequada do comportamento do sinal será necessário: conhecimento do parâmetro da equação de perda de percurso (λ); desvanecimento a uma dada distância de referência ($L(d_0)$); e desvio padrão de X_σ . Na literatura, é possível encontrar referências de indicação de valores de η , de acordo com o cenário de propagação. Na Tabela 3.1, são demonstrados valores associados a η comumente utilizados em alguns cenários (Tanghe et al. 2008).

Com adição das variações de η e X_σ , o sinal modelado demonstrará uma nova redistribuição de intensidade durante a propagação. Um exemplo pode ser observado na Figura 3.3. Outro exemplo das flutuações da potência do sinal ocasionadas por X_σ é demonstrada na Figura 3.4, com a demonstração de registros da potência recebida de um receptor a 6 metros do transmissor, em uma simulação com 1000 amostras.

Com a análise do comportamento do sinal, pode-se utilizar o modelo Log-distância para se determinar a distância entre estações, a partir de:

Tabela 3.1: Lista de expoente de perda de percurso.

Tipo de ambiente	η
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana pouco obstruída	3 a 5
Indoor com LOS	1,6 a 1,8
Indoor com NLOS	4 a 6

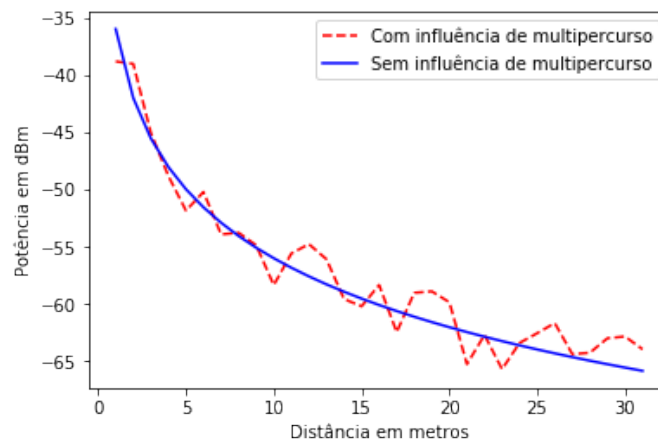
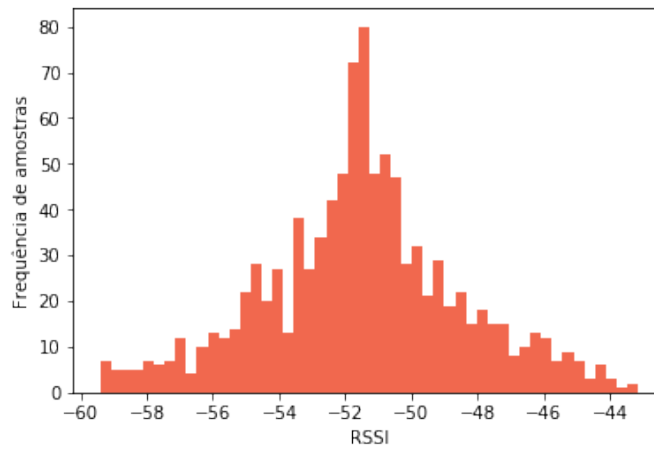
Figura 3.3: Nível de intensidade de um sinal ao longo do deslocamento com η igual a 2 e com influência de X_σ .

Figura 3.4: Histograma de RSSI a 6 metros de distância.

$$d = d_0 \cdot 10^{(Pd_0 - Pr)/10 \cdot \eta} \quad (3.6)$$

Em que:

- P_r é a potência recebida do sinal;
- d é a distância a ser estimada pelo método;
- d_0 a distância de referência, tratada no projeto como 1 metro;
- P_{d_0} é a potência recebida na distância de referência;
- η é a intensidade de perda de percurso do sinal.

Portanto, por meio da Equação 3.6 é calculada a distância entre estações móvel e fixa, para uma dada especificação de parâmetros do modelo de potência do sinal. Em especial, o parâmetro que introduz o erro mais recorrente na estimação da distância é η , que varia sua intensidade de acordo com a composição do ambiente e existência de estruturas entre dispositivos. Para a sua determinação mais precisa, é introduzido um método que estima de forma mais precisa a intensidade de η para uma dada âncora. O método é descrito no Capítulo 4 e compreende uma das contribuições dessa dissertação.

Outro parâmetro que influencia a estimação da distância e que não está modelado na Equação (3.6) é X_σ , que altera a intensidade da RSSI esperada. Uma forma de amortecer influências aleatórias devidas a X_σ é a observação ao seu comportamento adotado no modelo, a qual introduz um comportamento aleatório de média nula. Uma forma de amenizar seus efeitos está na recepção e registro de RSSI de um conjunto de amostras, coletadas pelo receptor durante a etapa de definição de distância entre estações, utilizando a média das amostras como referência de RSSI recebida. A escolha da média das amostras amortecem as estimativas a um valor central, como pode ser observado na Figura 3.4.

3.2 Padrões tecnológicos de transmissão

Ao tratar de transmissão de sinais em meios não guiados, os transmissores enviam sinais dividindo o meio de transmissão e utilizando de sinais de rádio (Kurose & Ross 2014). Durante a propagação, os sinais eletromagnéticos podem sofrer influências de outros sinais eletromagnéticos já propagados no ambientes, o que poderá levar a desfazer a formação original do sinal e corromper as informações transmitidas (Tanenbaum & Wetherall 2011). Um sinal corrompido impõe a proposta o não uso do sinal pelo sistema, o que afere a perda de alguma âncora de referência nas proximidades.

Para evitar sobreposições entre ondas de rádio, o meio convencionalmente é dividido em faixas de frequência, com a dedicação das faixas para cada tipo de aplicação (Tanenbaum & Wetherall 2011). A divisão do espectro de frequência pode ser observado na Tabela 3.2.

Dispositivos como smartphones ou tablets utilizam das faixas de frequência *Industrial Scientific and Medical (ISM)*, com o espectro de frequência de 2,4 GHz. Este espectro é livre para desenvolvimento, sem a necessidade de licenciamento para uso da faixa, desde que sejam seguidas as normas relativas a limitação de potência de transmissão e técnicas de modulação (Anatel n.d.). Dentro das faixas do ISM, o espectro de frequência 2,4 GHz detém destaque, com o uso da faixa para operação de diversas tecnologias de comunicação de dispositivos de uso cotidiano, como é o caso das tecnologias *Wi-Fi* e *Bluetooth*, duas

Tabela 3.2: Divisão do espectro de frequência.

Faixa de frequência (Hz)	Denominação Técnica
300 a 3000	E.L.F (<i>Extremely Low Frequency</i>)
3k a 30k	V.L.F (<i>Very Low Frequency</i>)
30k a 300k	L.F (<i>Low Frequency</i>)
300k a 3M	M.F (<i>Médium Fréquence</i>)
3M a 30M	H.F (<i>High Frequency</i>)
30M a 300M	V.H.F (<i>Very High Frequency</i>)
300M a 2G	U.H.F (<i>Ultra High Frequency</i>)
2G a 3G	U.H.F (<i>Ultra High Frequency</i>)
3G a 30G	S.H.F (<i>Super High Frequency</i>)
30G a 300G	E.H.F (<i>Extremely High Frequency</i>)

tecnologias normalmente empregadas nos dispositivos móveis ou em equipamentos para *IoT*.

3.2.1 Wi-Fi

Dispositivos com tecnologia de transmissão *Wi-Fi* utilizam dos protocolos de comunicação *802.11*, com especificações do grupo voltadas para definição de Redes Locais sem fio (*Wireless Local Area Network - WLAN*) (IEEE 2017). O protocolo *802.11* define seus conjuntos básicos de serviços (*Basic Service Set – BSS*) para criação de uma rede Infra-Estruturada, por meio de um Ponto de Acesso (*Access Point - AP*) responsável coordenar toda a rede (IEEE 2017). O Padrão também define que a infra-estrutura possa ser utilizada com uso de vários APs interligados, através de um *Backbone* de sistema de distribuição.

Quanto a transmissão de dados, é especificada na camada física. O padrão *IEEE 802.11* define a transmissão dos bits da informação através do canal de comunicação (Kurose & Ross 2014). A principal função da camada física está relacionada a modulação do sinal, com condicionamento da informação a ser enviada, em formato de ondas eletromagnéticas. Na camada ainda é especificado o uso de espalhamento no espectro (*Spread Spectrum*) para auxiliar o sinal na minimização de interferência entre canais (Tanenbaum & Wetherall 2011).

De forma geral, a camada física pode ser dividida em duas subcamadas: PMD e PLCP (Tanenbaum & Wetherall 2011, IEEE 2017). A subcamada de Dependência do Meio Físico (*Physical Medium Dependent - PMD*) lida com diferentes técnicas de transmissão, lidando com a modulação e codificação do sinal. A subcamada de Procedimento de Convergência da Camada Física (*Physical Layer Convergence Procedure - PLCP*) é a interface entre a PMD e a camada superior, com função de preparar as informações para a comunicação com a camada superior do modelo, ou manipular a PMD para enviar ou receber dados. Em suas operações, a camada física *802.11* adentra em três estados possíveis (Tanenbaum & Wetherall 2011):

- Detecção de Portadora: a PMD consulta periodicamente o meio, com finalidade de procurar por momentos ociosos de transmissão;
- Transmissão: a PLCP altera o estado de PMD de detecção de portadora para transmissão. No final da transmissão, altera novamente PLCP altera novamente o estado da PMD para detecção;
- Recepção: inicia quando a PMD se encontra no modo de detecção de portadora e é detectado um pacote de dados, desde que o sinal recebido possua intensidade de potência mínima de -85 dBm . A PLCP identifica o início e o fim do pacote, verificando a confiabilidade dos dados e passando o pacote para camada superior.

Durante as transmissões por espalhamento no espectro, este pode ser empregado por meio de técnicas como *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) e *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Na técnica FHSS, a banda do canal é dividida em 79 canais de frequência, com 1 MHz de largura cada, com os quais a transmissão ocorrerá em pequenos espaços de tempo. Os dados são enviados ciclicamente nos diversos canais, conforme uma sequência pré-definida (IEEE 2017), e a recuperação dos dados na recepção dos sinais percorrendo os subcanais, na mesma ordem da transmissão. O método de modulação DSSS, assim como o FSSS, a banda é dividida em canais, com aditivo de utilizar menos energia na intensidade nos sinais (Kurose & Ross 2014), com a operação de várias redes sem que elas interfiram entre si (Forouzan 2007). O DSSS utiliza o *Code Division Multiple Access* (CDMA) para a transmissão, gerando um tempo para cada de bit, dividindo em “n” intervalos denominados de “chips” (Prasad & Ojanpera 1998).

Para transmitir o bit “1”, o dispositivo enviará uma sequência de chips e para bit “0” é utilizado do complemento desta sequência. A camada física utiliza de uma sequência de *Barker*, formado por 11 bits, para espalhar os dados antes de transmitir. Cada bit transmitido é modulado por esta sequência, espalhando a energia em torno de uma banda de transmissão para transmitir a informação, enquanto o receptor concentra o sinal para recuperar a informação original. Ao longo do desenvolvimento do grupo 802.11, características como alcance de transmissão *indoor* mudaram de acordo com a atualização do protocolo, com alcance da versão 802.11n de até 70 metros (IEEE 2017).

3.2.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

Em relação a tecnologia de transmissão de dados *Bluetooth*, esta foi desenvolvida inicialmente pela *Ericsson Mobile Communications*, em 1994 (Bluetooth 2017). O Bluetooth serviu de base para a especificação IEEE 802.15.1. O padrão pertence ao grupo de especificações de *Personal Area Networks* (PANs) (IEEE 2017). O padrão opera utilizando das faixas de frequência de ISM, utilizando de FHSS, semelhante ao 802.11 (IEEE 2017). A faixa de frequência ocupada pelo *Bluetooth* é dividida em 79 canais com Bandas de 1 MHz entre 2402 MHz e 2480 MHz.

Um grupo de dispositivos *Bluetooths* formam uma *Piconet*, que é uma rede formada por até 8 dispositivos, com dos dispositivos na composição de 1 mestre e os demais como escravos. Todos os dispositivos da *Piconet* devem ser sincronizados ao relógio e sequência de salto de frequência em relação ao mestre (Persson et al. 2005). O padrão prevê a

possibilidade de comunicação entre *Piconetes* diferentes, por uso de um dispositivo comum centralizador, sendo o mestre, gerando *scatternets* (Tan et al. 2001). Na versão *Bluetooth 4.0*, é introduzido o *Bluetooth Low Energy* (BLE), em 2010.

Uma das principais diferença entre o BLE e versões clássicas do *Bluetooth*, está no consumo de energia, podendo apresentar um consumo de apenas 10% da bateria em relação ao *Bluetooth* clássico (Bluetooth 2017), servindo bem em dispositivos que não precisam transmitir grandes volumes de dados. O BLE utiliza a divisão da faixa de frequência em 40 canais com 2 MHz de espaçamento entre canais e, diferente da versão anterior, trabalha com possibilidade de conexão com mais de 8 dispositivos simultaneamente. O BLE atua com dois tipos de canais: Os Canais de advertência (*advertising channels*) e os canais de dados (*data channels*).

Os canais de advertência ocupam 3 dos 40 canais, com intuito de descobrir outros dispositivos no campo de ação, através de uma conexão e transmissão em *broadcast*. Os canais de informação, são utilizados durante a comunicação bi-direcional entre os dispositivos. Outra diferença entre uso dos canais, está com o *Bluetooth* clássico utilizando 32 canais como advertência, com um tempo de busca de dispositivos de 22,5 ms, enquanto o BLE gasta por volta de 1,2 ms com uso de apenas 3 canais. Para evitar colisões com sinais de outros dispositivos na mesma faixa de frequência, como da tecnologia *Wi-fi*, é usado o mecanismo *Adaptive Frequency Hopping* (AFH), para processo gerar uma readaptação dos canais, de forma de excluir os canais já ocupados da lista de canais disponíveis.

O BLE possui uma taxa de transferência de dados de até 1 Mb/s e alcance de sinal a depender da configuração de potência de transmissão, mas com alcance máximo de 50 metros. Junto as características de coexistência e transmissão dos dispositivos, um ponto interessante para o foco das tecnologias é relativo a popularidade e espalhamento dos dispositivos ao longo das infraestruturas. O *Wi-Fi* está como uma das tecnologias de transmissão de dados mais utilizadas no mundo (Junsheng 2017) (Khalajmehrabadi et al. 2017), e o *Bluetooth Low Energy* como tecnologia emergente para ser utilizada em diversos ambientes (Bluetooth 2017), como por espalhamento de estações em *hotspots* para uso em conceitos como *iBeacon* (ibeacon 2018).

3.3 Trilateração

Com os dispositivos, padrões de transmissão definidos e as distâncias entre transmissores e receptor estimadas, será possível utilizar algumas técnicas para determinar as coordenadas de um receptor em um dado ambiente. Um princípio comumente encontrado na literatura é a Trilateração (Junsheng 2017, Makki et al. 2015), com a solução visando computar uma posição desconhecida baseada na distância de um ponto para três outros de coordenadas conhecidas.

Em uma solução típica de trilateração, é formado uma circunferência em torno de cada ponto de coordenada conhecida, com raio igual a distância euclidiana do ponto conhecido para o ponto P desconhecido. A intersecção entre as três circunferências corresponde a posição do ponto desconhecido, como ilustrado na Figura 3.5. As distâncias euclidianas entre o ponto central e os três pontos de referência podem ser computadas no sistema de Equações (3.7):

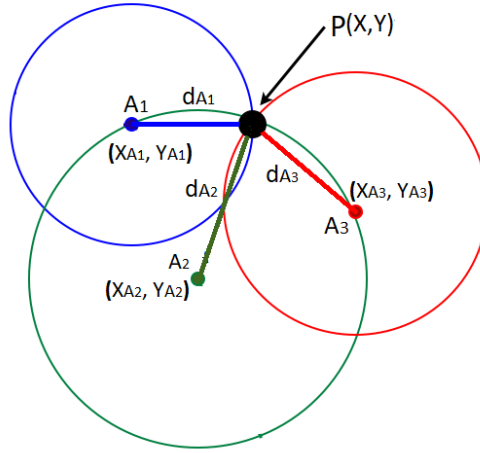


Figura 3.5: Localização da coordenada esta na intersecção dos três raios.

$$\begin{aligned}
 d_{A_1}^2 &= (X - X_{A_1})^2 + (Y - Y_{A_1})^2 \\
 d_{A_2}^2 &= (X - X_{A_2})^2 + (Y - Y_{A_2})^2 \\
 d_{A_3}^2 &= (X - X_{A_3})^2 + (Y - Y_{A_3})^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Na Equação (3.7), são representados:

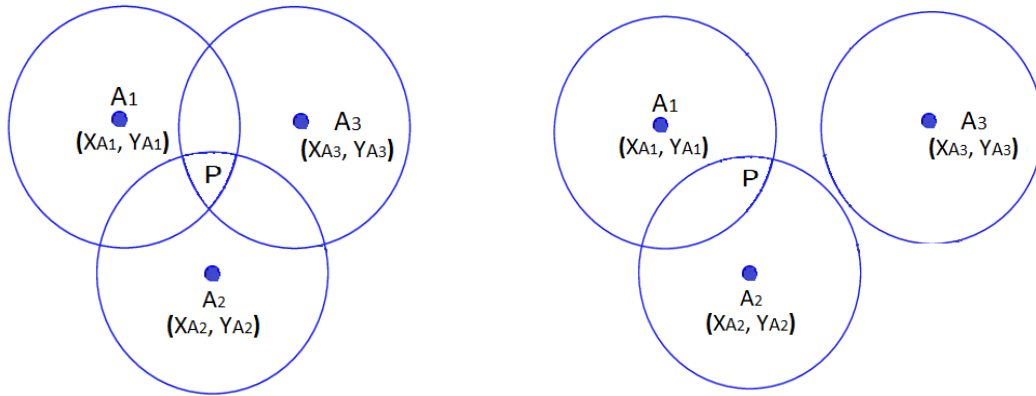
- X e Y correspondendo as coordenadas desconhecidas do ponto móvel;
- d_{A_n} indica a distância do dispositivo móvel para cada estação;
- X_{A_n} e Y_{A_n} são as coordenadas das estações fixas, com n definindo a referência para os pontos A_1 , A_2 e A_3 .

Os erros de estimação da distância com uso da RSSI pode implicar na ausência de intersecção entre as três circunferências em um ponto central (Boukerche et al. 2008), conforme ilustrado na Figura 3.6. Entretanto, computando ainda assim a Equação (3.7), por um método de otimização pode ser possível estimar uma posição P , com coordenadas (X, Y) afastadas da localização real do usuário (OnkarPathak & Tawari 2014).

Nesse caso, para computar a coordenada P , pode-se utilizar o Método dos Mínimos Quadrados, como será demonstrado a seguir. Adicionalmente, pode-se ainda implementar um corretor de distância com o objetivo de melhorar a acurácia do método. Uma solução para isso é apresentada no Capítulo 4 e compreende uma das contribuições desse trabalho.

3.3.1 Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Um problema notável sobre a computação da Equação (3.7) é a condição do sistema possuir 3 equações e apenas 2 variáveis. Dessa forma, o sistema não apresentará uma solução única (Anton & Busby 2011), indicando uma diversidade de coordenadas possíveis



(a) A posição do usuário P pode estar em qualquer ponto entre o encontro dos três arcos.

(b) A não intersecção entre arcos pode provocar um distanciamento muito grande da posição real do usuário.

Figura 3.6: Estimação errada da trilateração ocasionada pelo não encontro dos três arcos em um ponto comum.

para o ponto P. Uma solução para o caso é o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (Anton & Busby 2011).

MMQ é uma estratégia de otimização matemática que determina os parâmetros de uma relação funcional entre grandezas de um ou mais fenômenos medidos várias vezes com erros de leituras aleatórios (Anton & Busby 2011), como é o caso das distâncias entre estações por meio da RSSI. Para aplicação do método MMQ de uma forma generalizada (Anton & Busby 2011), será necessário inicialmente linearizar a Equação (3.7). O primeiro passo será subtrair a última equação (de índice 3) das demais, como segue:

$$d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2 = (X - X_{A_1})^2 - (X - X_{A_3})^2 + (Y - Y_{A_1})^2 - (Y - Y_{A_3})^2 \quad (3.8)$$

$$d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2 = (X - X_{A_2})^2 - (X - X_{A_3})^2 + (Y - Y_{A_2})^2 - (Y - Y_{A_3})^2 \quad (3.9)$$

Resolvendo os polinômios de segundo grau, encontram-se as Equações:

$$\begin{aligned} d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2 &= X^2 - 2.X.X_{A_1} + X_{A_1}^2 \\ &\quad - X^2 + 2.X.X_{A_3} - X_{A_3}^2 \\ &\quad + Y^2 - 2.Y.Y_{A_1} + Y_{A_1}^2 \\ &\quad - Y^2 + 2.Y.Y_{A_3} - Y_{A_3}^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2 = & X^2 - 2.X.X_{A_2} + X_{A_2}^2 \\
& - X^2 + 2.X.X_{A_3} - X_{A_3}^2 \\
& + Y^2 - 2.Y.Y_{A_2} + Y_{A_2}^2 \\
& - Y^2 + 2.Y.Y_{A_3} - Y_{A_3}^2
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Isolando apenas os elementos com X e Y, tem-se as Equações:

$$2.X.X_{A_1} + 2.X.X_{A_3} + 2.Y.Y_{A_1} + 2.Y.Y_{A_3} = d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2 - X_{A_1}^2 + X_{A_3}^2 - Y_{A_1}^2 + Y_{A_3}^2 \tag{3.12}$$

$$2.X.X_{A_2} + 2.X.X_{A_3} + 2.Y.Y_{A_2} + 2.Y.Y_{A_3} = d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2 - X_{A_2}^2 + X_{A_3}^2 - Y_{A_2}^2 + Y_{A_3}^2 \tag{3.13}$$

Ao evidenciar os elementos X e Y, determina-se as Equações:

$$X.(2.X_{A_1} + 2.X_{A_3}) + Y.(2.Y_{A_1} + 2.Y_{A_3}) = d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2 - X_{A_1}^2 + X_{A_3}^2 - Y_{A_1}^2 + Y_{A_3}^2 \tag{3.14}$$

$$X.(2.X_{A_2} + 2.X_{A_3}) + Y.(2.Y_{A_2} + 2.Y_{A_3}) = d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2 - X_{A_2}^2 + X_{A_3}^2 - Y_{A_2}^2 + Y_{A_3}^2 \tag{3.15}$$

Com o sistema podendo ser representado em forma matricial, pode-se obter:

$$Ax = b \tag{3.16}$$

Dado por:

$$\begin{bmatrix} (2.X_{A_1} - 2.X_{A_3}) & (2.Y_{A_1} - 2.Y_{A_3}) \\ (2.X_{A_2} - 2.X_{A_3}) & (2.Y_{A_2} - 2.Y_{A_3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$b1 = X_{A_1}^2 - X_{A_3}^2 + Y_{A_1}^2 - Y_{A_3}^2 + d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2$$

$$b2 = X_{A_2}^2 - X_{A_3}^2 + Y_{A_2}^2 - Y_{A_3}^2 + d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2$$

Comparando as Equações (3.16) e (3.17), encontra-se as Equações:

$$A = \begin{bmatrix} (2.X_{A_1} - 2.X_{A_3}) & (2.Y_{A_1} - 2.Y_{A_3}) \\ (2.X_{A_2} - 2.X_{A_3}) & (2.Y_{A_2} - 2.Y_{A_3}) \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$x = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$b = \begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{A_1}^2 - X_{A_3}^2 + Y_{A_1}^2 - Y_{A_3}^2 + d_{A_1}^2 - d_{A_3}^2 \\ X_{A_2}^2 - X_{A_3}^2 + Y_{A_2}^2 - Y_{A_3}^2 + d_{A_2}^2 - d_{A_3}^2 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Com o sistema representado em forma matricial, o MMQ poderá determinar as coordenadas (X,Y) do ponto P (Pivato et al. 2011), como segue:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.21)$$

3.4 PDR e Sistemas Inerciais

Uma das vantagens dos sistemas híbridos de localização *Indoor* é aproveitar a disponibilidade de várias fontes diferentes, adicionando novos referenciais que tendem a aprimorar seus resultados. Entre as fontes mais utilizadas para aumentar a eficácia dos sistemas de localização estão os sensores inerciais, com resultados bons a curto prazo e custo operacional reduzido (Correa et al. 2017).

Para o propósito de rastreamento de movimentação, na literatura encontra-se uma técnica bastante difundida, o método *Pedestrian Dead Reckoning Navigation* (PDR): o método é baseado em determinar a posição atual de um alvo utilizando como base uma posição anterior e no deslocamento realizado. Este método é baseado na técnica de navegação *Dead Reckoning Navigation*, historicamente utilizada na área de navegação de embarcações (Smithsonian 2018). O método define o deslocamento de um ponto em um plano cartesiano, utilizando o conhecimento de sua posição atual acrescida do deslocamento em cada coordenada do plano. Para destacar a movimentação do ponto, são necessários (Liu et al. 2015):

- Rastreamento da ocorrência do movimento;
- Distância percorrida ao ocorrer a movimentação;
- Sentido de deslocamento do alvo.

Todos os dados necessários para o rastreamento do deslocamento são coletados por meio de sensores inerciais, atrelados a um equipamento portado pelo usuário (Ojeda & Borenstein 2007). De posse das informações requeridas, a estimação da coordenada do alvo ocorre por atualização de coordenadas de eixos de um plano cartesiano, como ilustrado na Figura 3.7, e como apresentado na seguinte Equação:

$$\begin{bmatrix} X_K \\ Y_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{K-1} \\ Y_{K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) \\ \sin(\theta_k) \end{bmatrix} d_K \quad (3.22)$$

Compondo a Equação (3.22) temos os seguintes parâmetros:

- (X, Y) representando as coordenadas em um plano;
- θ é deslocamento angular das coordenadas em cada eixo;
- K representa o momento da estimação da coordenada;
- d_K a distância deslocada.

O uso da instrumentação irá variar de acordo com o porte do dispositivo. Por exemplo, o porte do dispositivo em um bolso de uma calça irá destacar o rastreamento por mudanças na aceleração angular, com indicação de uso de giroscópio. Considera-se neste trabalho que o porte do dispositivo estará na mão do usuário. Para a tarefa de rastreamento da ocorrência do movimento do usuário, são utilizadas as oscilações da leitura da aceleração linear durante

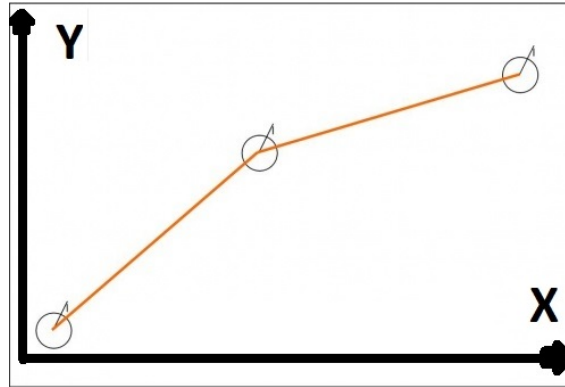


Figura 3.7: Visualização do método PDR e atualização de coordenadas em um plano cartesiano.

a ocorrência de uma marcha de uma pessoa, com uso de um acelerômetro para realizar as medições e registrar a oscilação da aceleração.

No uso em navegações, o sistema de rastreo da direção de deslocamento da embarcação eram baseados em bússolas. De forma semelhante, a direção do dispositivo dentro do plano representativo da construção pode ser rastreada, utilizando como bússola digital um sensor virtual conhecido como Sensor orientação (Milette & Stroud 2012). Para a geração do sensor orientação são necessários o uso de dois sensores, o acelerômetro e o magnetômetro. Portanto, sendo o método PDR baseado nos sensores acelerômetro e magnetômetro, faz-se necessário a discussão de aspectos relacionados aos sensores, demonstrado nas próximas seções.

3.4.1 Acelerômetro

Este é um sensor construído a partir de sistemas microeletromecânicos (*Microelectromechanical systems - MEMS*). O sensor tem a capacidade de medir o deslocamento de uma massa com um circuito de medição de posição, com a medição derivada de um sinal elétrico, digitalizado por um conversor analógico-digital para processamento digital (Milette & Stroud 2012).

Muitos sistemas embarcados, como smartphones ou tablets, possuem acelerômetros como parte de seus dispositivos internos. Normalmente os acelerômetros possuem medição da aceleração em torno de 3 eixos (X, Y, Z) (Röbesaat et al. 2017). O sensor é capaz de captar as leituras pela soma das forças aplicadas sobre os eixos do dispositivo, incluindo a força da gravidade (Milette & Stroud 2012). A aceleração pode ser estimada com base na Equação:

$$a_d = -\frac{\sum_{i=1}^f F_{(f)}}{Ma} - g \quad (3.23)$$

Em que:

- a_d é a indicação da aceleração linear do eixo;
- $F_{(f)}$ fornece a indicação das f forças aplicadas no corpo;

- g fornece a influência da gravidade, com magnitude de aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$;
- Ma fornece a massa do dispositivo.

A influência da gravidade adiciona aos eixos, em especial, aquele a qual esteja em sentido contrário ao sentido da gravidade, a existência de uma amplitude elevada nas medições. Essa influência pode ser notada com a exemplificação da medição da aceleração, com o dispositivo estático sobre uma superfície. Neste caso, o sensor indicará a medição de aceleração sobre um dos seus eixos, enquanto os outros estão estáticos.

Seguindo o exemplo, o smartphone utilizado no trabalho está estático sobre uma superfície plana. Nesta aplicação, os eixos X e Y indicarão aceleração de aproximadamente 0 m/s^2 , enquanto o eixo Z estará medindo aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$, indicando a força exercida pela gravidade por ser o único eixo no sentido contrário a força da gravidade. Na Figura 3.8 é ilustrado um exemplo de medição. As leituras dos sensores estão registrados na Tabela 3.3. Para a medição da aceleração linear do dispositivo se faz necessário a retirada da influência da gravidade, efetivado com uso de um sistema de filtros (SensorEvent 2017).

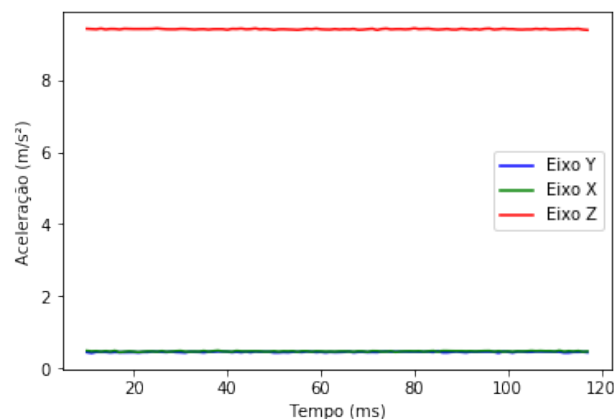


Figura 3.8: Aceleração nos 3 eixos de um acelerômetro em um smartphone estático em uma mesa.

Tabela 3.3: Medições do eixo de um acelerômetro posicionado em uma mesa.

Medição	<i>Eixo X</i>	<i>Eixo Y</i>	<i>Eixo Z</i>
Média (m/s^2)	0,473129	0,453397	9,403603
Desvio padrão (m/s^2)	0,009094	0,010392	0,010502

Filtro de medições

Durante as leituras dos eixos do sensor, como relatado anteriormente, os dados coletados estão influenciados pela gravidade, que para a proposta de rastreamento de movimento,

atua como um ruído na leitura. Uma forma de retirar a influência dos ruídos é o uso de filtros de ruídos.

Os filtros tem como função a retirada de informações indesejáveis de uma dada informação base, aproximando o sinal medido de sua formação real. Para esta tarefa são selecionados faixas que designam quais leituras devem ser atenuadas, permitindo que apenas a informação fora da faixa de corte seja mantida. Dois tipos de filtros comuns são: filtro passa alta, que permite a passagens de informações acima da faixa de corte; e o filtro passa-baixa, que permite a passagem de informações abaixo da faixa de corte.

Um método baseado no uso de filtros para retirar a influência da gravidade da informação útil pode ser encontrado em Milette & Stroud (2012). Neste método é utilizado um filtro passa-alta para retirar a influência da gravidade da leitura. Para a aplicação do filtro passa-alta, é utilizado um filtro passa-baixa para se destacar a influência da gravidade na leitura ser retirada em seguida da leitura atual do sensor por uma operação de subtração.

O filtro passa-baixa atua como um suavizador de leituras dos dados, com uso de ponderação de um valor mais recente em relação a uma média mais antiga (Milette & Stroud 2012). Um parâmetro de ponderação é utilizado para a operação, como demonstrado nas Equação (3.24), e em seguida a Equação (3.25) que descreve a aplicação do filtro passa-alta:

$$Gravi_{[i]}[K] = Gravi_{[i]}[K - 1].\alpha + (1 - \alpha) * Acelinear_{[i]}[K - 1] \quad (3.24)$$

$$Acelinear_{[i]}[K] = Acel_{[i]}[K] - Gravi_{[i]}[K] \quad (3.25)$$

Nas Equações (3.24) e (3.25) , tem-se:

- K é o momento no tempo;
- i é a indicação do eixo de leitura do sensor, com $i = 0$ para indicação do eixo X , $i = 1$ para eixo Y e $i = 2$ para eixo Z ;
- $Acel_{[i]}$ representa a leitura atual do sensor;
- $Gravi_{[i]}[K]$ indica a leitura da influência da gravidade isolada com o filtro passa-baixa no eixo, inicialmente zero no instante $K=0$;
- $Acelinear_{[i]}[K]$ fornece a aceleração linear no eixo.
- α parâmetro de ponderação.

O parâmetro de ponderação determina a contribuição dos dados para a formação da medida. A eliminação de ruídos de frequências mais altas ocorre pela suavização do resultado, proporcionado pela relação das leituras (como visto na Equação (3.24). O fator de ponderação α pode ser determinado com base na Equação (3.26):

$$\alpha = \frac{t}{t + \delta t} \quad (3.26)$$

Na Equação (3.26), tem-se:

- α fator de proporcionalidade, que assume valores entre 0 e 1;
- t é a duração relativa do sinal a qual o filtro estará atuando;
- δt período de amostragem entre uma leitura anterior e atual.

A escolha dos parâmetros para determinação de α indicaram a atuação do filtro, entretanto, uma escolha inadequada da pode indicar a não atuação do filtro na faixa desejada. Em casos de atenuação de ruídos para adquirir a aceleração linear, as documentações do sistemas operacional ANDROID indicam o uso de α com valor de 0,8, baseados nos t e δt padrões do dispositivo (Integrated 2017, Milette & Stroud 2012).

Análise dos dados do acelerômetro

Com os dados filtrados, as leituras dos sensores podem ser reavaliadas, seguindo inicialmente com o exemplo do smartphone estático em uma superfície, os valores médios de aceleração estão relacionados na Tabela 3.4. Com o rastreo da aceleração linear em cada eixo, será possível determinar quando o dispositivo está em movimento mais facilmente. Na Figura 3.9, está ilustrado um exemplo de uma caminhada, com porte do smartphone sendo levado na mão de um usuário durante uma caminhada de 10 passos, sem influência da gravidade.

Tabela 3.4: Medições de um acelerômetro sem a aceleração gravitacional.

Medição	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média (m/s^2)	0,216288	-0,026502	-0,000348
Desvio padrão (m/s^2)	0,007923	0,011174	0,011124

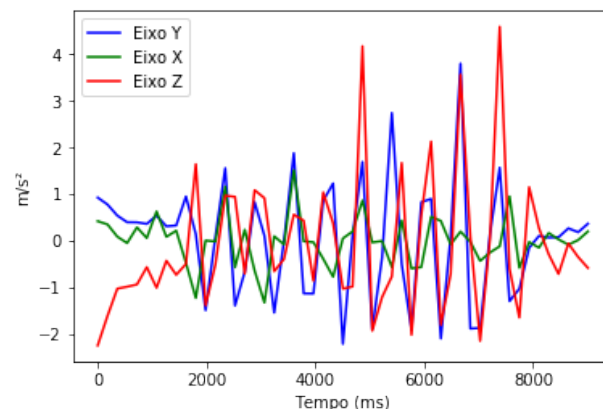


Figura 3.9: Aceleração linear nos 3 eixos em uma caminhada de 10 passos sem influência da gravidade.

3.4.2 Magnetômetro

Este sensor é utilizado na medição da densidade, direção e sentido de campos magnéticos em sua proximidade, com as leituras do sensor retornando a densidade do fluxo magnético B em Tesla ou As/m^2 (Milette & Stroud 2012, Jain 2012). O magnetômetro é um

sensor comum em diversos tipos de sistemas móveis, como smartphones ou tablets, ele é capaz de detectar o campo magnético ao longo de três eixos (X, Y, Z) (INNOVENTIONS 2017). A magnitude M pode ser estimada conforme segue:

$$M = \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (3.27)$$

Na Equação (3.27), as variáveis MX , MY e MZ correspondem as leituras do fluxo magnético em cada um dos eixos do sensor. Um exemplo de leitura do sensor é observado na Tabela 3.5, com o registro da leitura média de cada eixo do sensor e da definição da magnitude média, e a Figura 3.10 que ilustra uma medição do sensor nos três eixos do dispositivo ao longo do tempo.

Tabela 3.5: Medições de um magnetômetro

Medição	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Magnitude
Média (μT)	-15,902340	13,044434	48,395223	15,1791
Desvio padrão (μT)	1,713324	1,359454	1,189922	1,4209

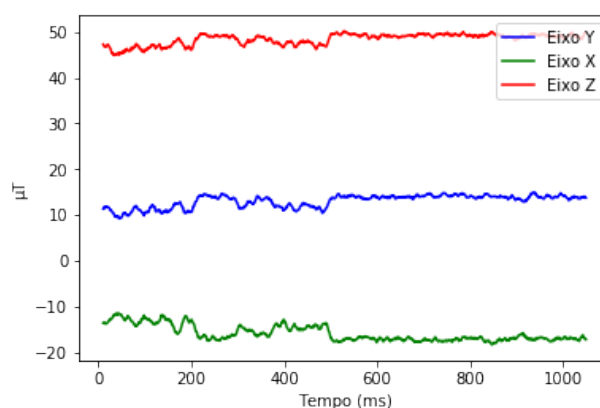


Figura 3.10: Leitura dos 3 eixos de um magnetômetro em um smartphone estático em uma mesa.

3.4.3 Sensor Orientação

Na geração de coordenadas pelo sistema inercial é necessário rastrear a direção do deslocamento. A direção segue como a mudança da posição do ponto que representa o alvo nas coordenadas (X, Y) do plano de referência. O rastreamento da direção é baseada inicialmente na forma que o dispositivo é portado, considerando que o dispositivo está na mão do usuário, esta será rastreada também quanto a mudança de direção de sua face, no caso de uma guinada. A captação da guinada dentro da representação de coordenadas do eixo cartesiano, ocorre com uso do sensor orientação. Este sensor é formado pela combinação

dos sensores acelerômetro e magnetômetro, e o sensor atua de forma semelhante a uma bússola digital de três eixos (Milette & Stroud 2012).

O sensor fornece a orientação do dispositivo (em graus) em relação ao polo magnético do planeta. As leituras são expressas ao longo de três eixos, como ilustrado na Figura 3.11, as quais são: X (*pitch*); Y (*roll*); e Z (*azimute*). No que tange os aspectos do rastreo da guinada do smartphone portado na mão do usuário, será apenas necessário utilizar dados do eixo azimute (Developeres 2018), definido como um ângulo entre o norte magnético do planeta e o eixo Y do dispositivo, que descreve a quantos graus de distância o dispositivo está em relação ao norte. Dois exemplos do direcionamento do eixo são (*SensorEvent* 2017):

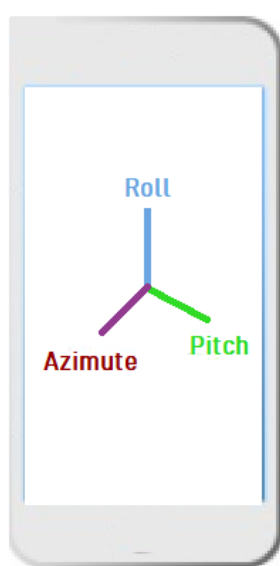


Figura 3.11: Três eixos de orientação de um smartphone .

- Caso o eixo Y do dispositivo estiver alinhado com o norte magnético, seu valor será de 0° ;
- Enquanto o eixo Y estiver direcionado ao polo o sul, o valor de Azimute será 180° .

Com base na informação da posição do alvo em relação ao polo magnético, a guinada segue como a diferença da angulação atual do eixo em relação a uma nova leitura desse ângulo, registrada durante a movimentação do portador do dispositivo. Um exemplo de leitura do sensor é ilustrado na Figura 3.12, onde percebe-se a diferença nas medições de valores na mudança de direção do usuário em uma caminhada. A mudança destacada na Figura 3.12 se refere a principal mudança de direção do usuário. O restante das medições demonstram uma pequena variação entre leituras, o que é devido ao ruído de leitura na estimação de movimentos retilíneos, levando a um desvio de até 6° entre suas orientações reais.

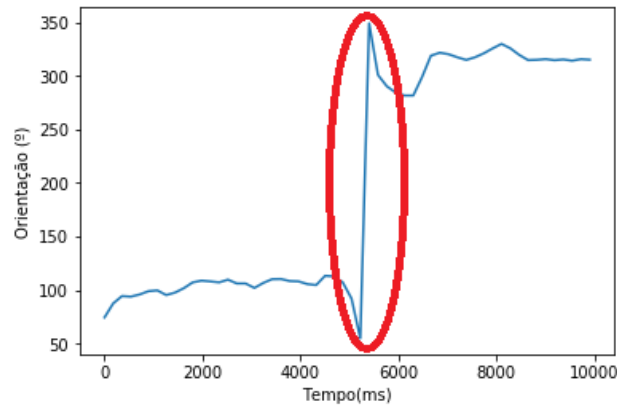


Figura 3.12: Mudança de orientação em uma caminhada através do eixo *azimute* .

3.4.4 Contador de Passos

O método PDR necessita determinar o quanto foi deslocado por ocorrência de movimentação, para em conjunto ao ângulo de orientação, atualizar as coordenadas estimadas atuais. Para essa tarefa, será gerado um Contador de Passos e deslocamento. A prática de contar passos pode ser entendida como a ocorrência da marcha de uma pessoa, a qual pode ser identificada como uma permuta entre o ato de levantar um pé e colocá-lo de volta ao chão a uma certa distância (Lan & Shih 2013).

A detecção de um passo pode ser associada como a chegada de um pico de aceleração vertical no sensor, que acontece no ato de levantar o pé. Durante uma marcha, um ser humano tende a realizar movimentos notáveis e periódicos, associados ao ato de erguer e repousar o corpo ciclicamente (Lan & Shih 2013). Existem diferentes métodos para identificar o passo com uso dos sensores inerciais, uma das mais simples é a identificação de picos positivos nas leituras. Por exemplo, é possível notar na Figura 3.13 a presença de picos de medição da aceleração, associando a movimentação do corpo durante uma caminhada.

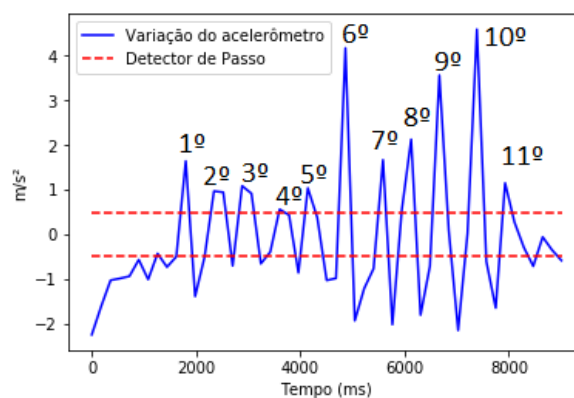


Figura 3.13: Contagem de passos por referências.

Adicionalmente, em uma leitura espera-se um formato sinusoidal para cada passo com

picos bem definidos (Jimenez et al. 2009). Entretanto, falsos picos são introduzidos na detecção de passos devido a presença de ruídos nos dados dos sensores. Os ruídos estão atrelados a sensibilidade do sensor e movimentos involuntários durante a caminhada, como pode ser notado na Figura 3.13, com o quarto pico sendo um falso pico relacionado a um passo.

Uma forma de lidar com falsos picos de medição é a associação de leitura a frequência de ocorrência de um passo e uma segunda referência de leitura, associada ao ato de repousar do corpo no fim da marcha. Nessa tarefa é adicionada uma segunda referência para a leitura, de mesmo valor, mas de magnitude contrária a referência anterior, ocasionadas durante a permuta entre erguer e repousar o corpo. Ao detectar a ocorrência de um valor de referência, é esperado o registro de uma leitura negativa, e entre as leituras deve-se passar um tempo de ocorrência (Najme et al. 2012). O tempo de ocorrência de um passo humano está entre 150 *ms* e 400 *ms*, indicando uma frequência de passo de aproximadamente 2 Hz (Jin et al. 2011).

Dessa forma, o contador de passos adotado neste trabalho segue a seguinte orientação:

- Primeiro, durante a medição do acelerômetro deve ser mensurado um pico que ultrapasse o valor de referência previamente estabelecido;
- Em seguida, espera-se a detecção de um pico negativo;
- Terceiro, para considerar o passo correto, a medição deverá ocorrer dentro do espaço de tempo entre 150 *ms* e 400 *ms*, caso contrário não é considerado um passo.

Distância percorrida por um passo.

Junto a detecção de passos, a estimação do total deslocado necessitará de um parâmetro de deslocamento que descreva a distância percorrida por um passo do usuário. Porém, a definição de espaço deslocado por um passo se torna um gerador de erro de coordenada para o PDR devido a difícil tarefa de estimar o deslocamento real por cada passo de um usuário específico.

Uma aproximação viável é o uso da distância média de um passo, gerado por uma relação entre a média da altura entre pessoas. A relação indica que a média de passo de homens tem por volta de 73 *cm* e de uma mulher por volta de 67 *cm*. Portanto a estimação do tamanho de um passo humano poderá ser indicado como a média entre os dois gêneros, tendo como valor de 70 *cm* em cada passo (Kent 2017). O valor médio de 70 *cm* é adotado neste trabalho para indicar a distância percorrida por um passo.

3.5 Filtro de Kalman

Ao longo das seções anteriores foram discutidos os métodos de sistemas inerciais e dos sistemas baseados em redes para rastreamento da posição do usuário. A abordagem proposta requer o uso de um interpolador para os métodos, sendo o resultado, a coordenada híbrida estimada. Neste trabalho será adotado para a tarefa de fusão de dados o Filtro de Kalman (Kalman 1960).

O Filtro de Kalman (FK) foi desenvolvido por Rudolf Emil Kalman em 1960, com a descrição de uma solução recursiva para o problema da filtragem linear de dados discretos. Desde então, com o avanço computacional, o FK tem sido uma ferramenta muito importante nas áreas de navegação, monitoramento de processos, reconstrução de sinais degradados por ruídos, etc (Silva 2007).

O FK é um algoritmo para cálculo de estimativa de estados instantâneos, com uso de um sistema dinâmico e linear perturbado por um ruído branco gaussiano. No algoritmo, também são utilizadas medidas linearmente relacionadas aos estados observados, que também podem estar corrompidas por ruídos (Silva 2007). O Filtro de Kalman é uma boa ferramenta para interpolação dos métodos para a localização híbrida, visto o uso do dinamismo de seus sistemas associado a medida realizada. Estando no filtro associado o método PDR como o dinamismo do sistema e a trilateração como as medições observadas.

As equações que regem o algoritmo do Filtro de Kalman podem ser agrupadas em dois grupos (Koo et al. 2014): grupo de predição e grupo de atualização. O grupo de predição utiliza de estimativas a priori, estimando o estado atual apenas com dados de um estado anterior, não incluindo dados observados no tempo atual (Koo et al. 2014). Na sequência, o estado atual é incrementado com a atualização, na qual a estimativa a priori é corrigida com uma observação atual, resultando em uma estimativa combinada, conhecida como estimativa a posteriori (Junior 2016).

3.5.1 Grupo de Predição

A formulação do FK é iniciada pelas equações pertencentes ao grupo de predição, utilizando o modelo de dinamismo do sistema. No grupo de predição, são utilizados as estimações da leitura de interesse ($\hat{X}_{(K)}$) e a matriz de covariância do erro ($\hat{P}_{(K)}$), a cada instante de tempo (K), baseados nos valores do estado anterior do sinal de interesse.

A estimativa a priori do sinal de interesse é baseada na medida do próprio sinal no passo anterior, aqui representado como coordenadas atuais do alvo ($X_{(K-1)}$). A leitura atual portanto se faz com a medida das coordenadas atuais e sua mudança de variação de coordenada ($u_{(K)}$), utilizadas no trabalho como atualizações do PDR. A matriz de covariância do erro a priori ($\hat{P}_{(K)}$) é baseada em seu próprio valor no passo anterior, ($\hat{P}_{(K-1)}$) e no ruído de processo inerente ao dinamismo do sistema ($Q_{(K)}$), e A indicando uma matriz identidade (Junior 2016). Tais processos podem ser visualizados nas Equações:

$$\hat{X}_{(K)} = X_{(K-1)} + u_{(K)} \quad (3.28)$$

$$\hat{P}_{(K)} = A.P_{(K-1)}.A^T + Q_{(K)} \quad (3.29)$$

3.5.2 Grupo de Atualização

No grupo de atualização são realizados os cálculos de correção, sendo estimadas novas referências para a leitura de interesse ($\hat{X}_{(K)}$), e a matriz de covariância do erro ($\hat{P}_{(K)}$). A atualização desses elementos ocorre pelo chamado ganho de Kalman ($K_{(K)}$), que utiliza a matriz de covariância do erro estimado na fase de predição, e no ruído das medidas do sistema de observação ($R_{(K)}$), adotado no trabalho como as coordenadas da trilateração,

e C uma matriz identidade. A finalidade do ganho tem por amenizar a influência da covariância do erro no sinal de interesse (Junior 2016). A expressão do Ganho de Kalman é representada então como segue:

$$K_{(K)} = \hat{P}_{(K)} \cdot C^T \cdot (C \cdot \hat{P}_{(K)} \cdot C^T + R_{(K)})^{-1} \quad (3.30)$$

Com o ganho de Kalman estimado, são realizadas as atualizações, iniciando pela atualização do sinal de interesse, gerando uma estimativa posteriori. Para tarefa de atualização, é utilizado junto ao ganho de Kalman uma medição do estado observado ($Y_{(K)}$), adicionado no modelo do projeto como os dados da trilateração. Tal processo de atualização pode ser observado por:

$$X_{(K)} = \hat{X}_{(K)} + K_{(K)}(Y_{(K)} - \hat{X}_{(K)}) \quad (3.31)$$

No final do grupo da atualização, a matriz de covariância do erro é atualizada. O processo segue utilizando o ganho de Kalman e a estimativa da matriz de covariância obtida na fase de predição, isso é, a estimativa a priori (representado o estado a priori nas equações com o símbolo “ \wedge ”). $P_{(K)}$ representa também as coordenadas (X,Y) computadas no processo de fusão. A Equação (3.32) representa a atualização de $P_{(K)}$:

$$P_{(K)} = \hat{P}_{(K)} - K_{(K)} \cdot C \cdot \hat{P}_{(K)} \quad (3.32)$$

De forma geral no FK, o ganho de Kalman representa as contribuições dos modelos do dinamismo do sistema e do estado observado. O controle do ganho é aferido por meio dos ruídos gerados nos modelos utilizados ($R_{(K)}$ e $Q_{(K)}$). Quanto maior intensidade de $R_{(K)}$ em relação a $Q_{(K)}$, mais confiáveis serão os dados gerados pela definição do dinamismo do sistema, e uma maior definição de $Q_{(K)}$ em relação a $R_{(K)}$ indica uma confiança maior nos dados gerados pela observação. No total, a geração dos dados finais é formada por partes da informações de cada modelo, que são executadas no algoritmo do método a começar pelo grupo de predição e em seguida pelo grupo de atualização, a cada momento K , como ilustrado na Figura 3.14, assim oferecendo um amortecimento aos ruídos de cada modelo a medida que são fornecidas as novas leituras.

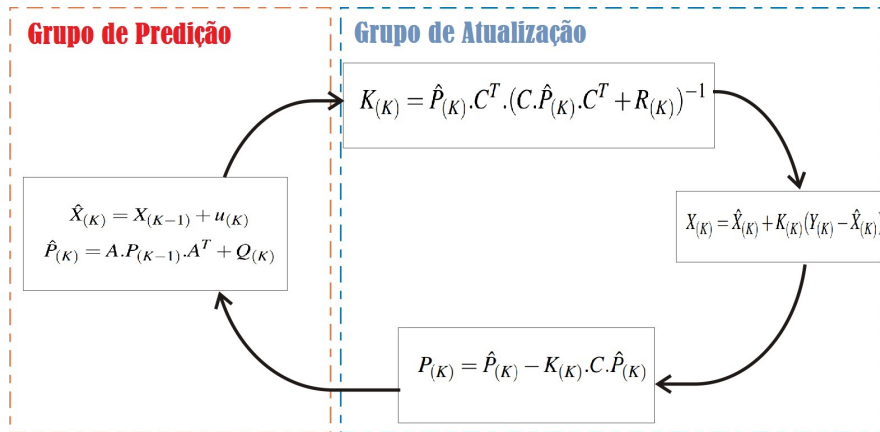


Figura 3.14: Fluxograma do Filtro de Kalman a cada medição K .

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo é apresentado a metodologia para uma ILS híbrida e suas características, etapas e fluxo de execução.

4.1 Formulação do Problema

No problema de localização de um alvo em um ambiente *indoor*, se faz necessário avaliar alguns requisitos que norteiam o projeto. A partir destes, será determinado a composição total do sistema. Os requisitos em análise são:

- Nível de granularidade da localização: a posição de interesse poderá ser expressa em forma da presença do alvo em um dos ambientes da área sob estudo ou como uma coordenada específica em um plano cartesiano ou mapa, o que requer uma definição mais granular;
- Descrição do equipamento do usuário: o modo como o dispositivo portado pelo usuário irá participar da aplicação de localização (local do porte, tecnologias de sensoriamento e comunicação suportada, etc);
- Descrição dos equipamentos do ambiente: os equipamentos de transmissão que serão tratados como âncoras descreverão as possíveis técnicas de localização aplicadas;
- Nível de precisão da aplicação: a depender do caso, a tecnologia e esforço empregado pode variar. Serviços com atendimento de casos simplificados podem utilizar apenas questões de presença no ambiente ou perímetro, enquanto serviços mais complexos, como segurança, podem requerer um rastreo mais preciso;
- Tempo de atualização da localização: o tempo de atualização da coordenada irá influenciar sobre o poder de processamento utilizado no estudo de caso.

A descrição dos requisitos citados formam a base necessária para investigação e definição do estilo de sistema de localização *indoor* a ser utilizado. Seguindo os critérios destacados como norteamento, a criação de uma metodologia para localização *indoor* se faz com a descrição do caso de uso.

4.2 Descrição do caso de uso

Para gerar uma solução de localização *indoor*, o sistema deve ser definido com base no ambiente de implementação e os equipamentos utilizados. Neste ambiente, o usuário terá sua localização requisitada, a qual será definida com base nos transmissores sem fio localizados no ambiente, assim determinando suas coordenadas dentro de um plano cartesiano representativo do ambiente. Para garantir melhores resultados em futuras requisições, o usuário terá sua movimentação rastreada por meio por seus movimentos, com os dados gerados combinados com as informações extraídas dos transmissores.

No local, os transmissores instalados são pertencentes aos os grupos tecnológicos *Wi-Fi* e *BLE*. Estes dispositivos emitem sinais com informações de suas operações. Os sinais emitidos são captados por um smartphone portado pelo usuário, que identificará o nível de intensidade dos sinais recebidos e quais estações foram suas fontes geradoras. Adicionalmente, o smartphone possui embarcado em seu sistema uma IMU, que será utilizada para registrar a mudança na aceleração do usuário e sua mudança de orientação.

Visando fornecer o melhor resultado, o sistema a ser proposto combina os dados das redes de transmissores sem fio com dados inerciais, gerando um processo híbrido de estimação da coordenada. A Figura 4.1 descreve uma visão geral do caso de uso que serve de base para a metodologia proposta nesse trabalho.

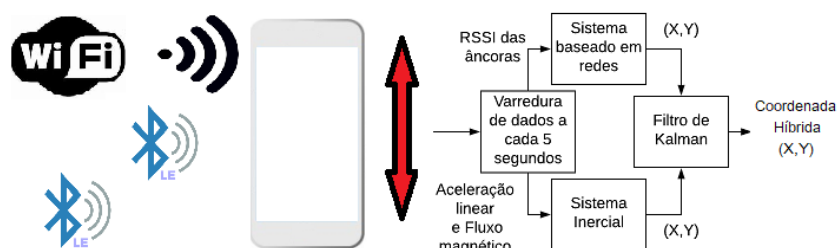


Figura 4.1: Visão geral do caso de uso da proposta de localização *indoor*.

4.3 Visão geral e fluxograma de execução da metodologia

A visão geral da metodologia proposta nesse trabalho é descrita na Figura 4.2. A etapa inicial da metodologia parte do posicionamento do usuário, expressa por uma coordenada $P(X,Y)$ em um plano cartesiano. Com o objetivo de minimizar o erro e obter respostas rápidas, é utilizado como base um sistema de coordenadas derivado de fontes diferentes, cada uma atualizada em K instantes de tempo, escolhido no projeto como 5 segundos.

A primeira coordenada é proporcionada por um sistema de localização baseado em redes de transmissores, utilizando os dados gerados pela transmissão de sinais via rádio. A segunda coordenada de referência é proporcionada por um sistema inercial, com rastreamento do movimento do alvo ao longo do ambiente. Ao final, as coordenadas derivadas dos dois modelos são combinadas, gerando uma nova coordenada, e associada como resolução do sistema híbrido empregado. Assim, ao longo das próximas seções são descritas as soluções aplicadas nas gerações das coordenadas base do modelo, bem como a geração

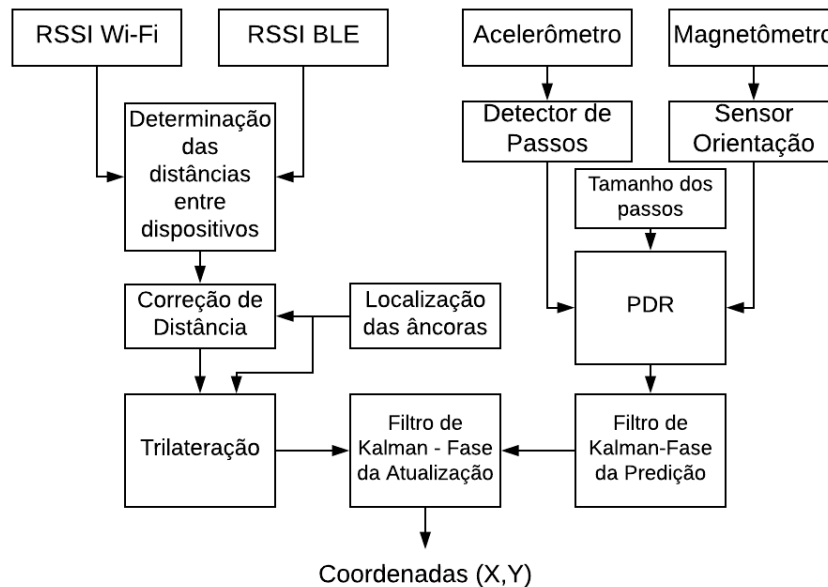


Figura 4.2: Fluxograma da metodologia de localização híbrida.

da coordenada híbrida, seguindo como orientação a ordem pelo fluxograma apresentado na Figura 4.2.

4.4 Coordenadas por Sistemas de redes de Transmissores

O método utiliza as coordenadas dos sistemas de base para aferir os resultados combinados desejados, e para tal será necessário a implementação de modelos que servem para solucionar a requisição. A primeira coordenada base será formulada em função de um sistema baseado em redes, ao qual utilizará os dispositivos presentes no ambiente para a operação. Em uma concepção inicial, os dispositivos instalados no local serão os pontos de referência, e a partir das distâncias do usuário para os pontos de referência é possível determinar a localização do alvo.

Os transmissores de sinais sem fio instalados emitem informações sobre suas operações, as quais são captadas como referências pelo smartphone portado pelo usuário. De posse das informações recebidas, o dispositivo irá utilizar os transmissores como âncoras (referências) para sua localização, considerando que o sistema já conhece a localização de cada transmissor. Um dos dados utilizados para a determinação da localização são as RSSI, que em uso com os parâmetros de transmissão de potência de referência (em dbm) e desvanecimento de larga escala, aferem a coordenada do smartphone. De base base desse fato, é aferido a distância do dispositivo móvel para as âncoras como na seção a seguir.

4.4.1 Determinação das distâncias entre dispositivos

A distância entre o dispositivo móvel, portado pelo usuário, e os módulos âncoras de comunicação é determinada com base no modelo de propagação Log-distância. Esse modelo foi descrito na seção 3.1. A Figura 4.3 ilustra o comportamento da intensidade da recepção dos sinais e sua influência com a distância das fontes (módulos âncoras).



Figura 4.3: Distância entre estações pode ser estimada no modelo de desvanecimento do sinal .

Conforme descrito na Seção 3.1.1, um sinal emitido por um módulo de transmissão sem fio é influenciado por efeitos de desvanecimento de pequena e larga escala. Os efeitos de desvanecimento de pequena escala variam a indicação de intensidade a uma dada distância, podendo a intensidade do sinal aumentar ou diminuir em proporções não esperadas. Enquanto o desvanecimento de larga escala está associado a permissividade do ambiente para propagação de sinais eletromagnéticos. Ambos os efeitos provocam deturpações no modelo, que introduzem erros na definição da distância entre estações.

Os efeitos de desvanecimento de pequena escala introduzem aleatoriedade na intensidade esperada de um sinal, fornecendo diversas referências de RSSI para uma mesma posição. Uma medida para amortecimento dos efeitos aleatórios se faz com o acúmulo de amostras da RSSI de cada estação, utilizando da média de amostras para estimação da distância. O uso da média das RSSI serve para aproximar valores aleatórios para um dado valor central, que tenderá a aproximar o valor esperado de RSSI recebido do valor real da distância entre estações.

Portanto, o método de geração de coordenadas baseado em redes, é iniciado com a coleta das RSSI das âncoras do sistema, com o tempo de coleta definido neste trabalho de 5 segundos. A identificação dos módulos âncoras é feita com base no campo *Media Access Control* (MAC), presente nos pacotes de dados dos padrões de transmissão (Kurose & Ross 2014, Tanenbaum & Wetherall 2011). A partir da média das RSSI coletadas de cada âncora, tem-se o valor de Pr na Equação (4.1). Para se obter d , ainda é necessário

determinar para cada âncora o valor do parâmetro η do desvanecimento de larga escala e a RSSI (Pd_0) de um metro de distância como referência (d_0).

$$d = d_0 \cdot 10^{(Pd_0 - Pr)/10 \cdot \eta} \quad (4.1)$$

Para uso da Equação (4.1), os parâmetros conhecidos sobre cada âncora são sua posição no local, potência de referência (Pd_0) e desvanecimento de larga escala (η). Com uso desses parâmetros diferenciados de cada estação, o sistema é capaz de normalizar os diferentes padrões de transmissão baseados na distância entre estações.

Entre os parâmetros, o desvanecimento de larga escala η possui diferentes indicações de valor, baseado nas particularidades do ambiente em interação com o sinal propagado. Na literatura, costuma-se associar o valor de η a 2 em ambientes livres, mas este valor pode introduzir erros na estimação da distância entre estações devido as particularidades do ambiente. Assim, no intuito de aproximar os resultados computados da distância real entre estações, é realizada a definição do desvanecimento η para cada estação. Dessa forma, representando o desvanecimento dos sinais de cada estação em relação a suas barreiras locais dentro do ambiente. A definição de η para cada estação segue um modelo de avaliação apresentado neste trabalho e pode ser conferido na Seção 4.4.2 deste capítulo.

Entretanto, mesmo com os métodos aplicados, a estimação da distância entre estações pode resultar em resultados inadequados. A causa se deve a mudanças na distribuição de barreiras no local, como passagem de pessoas em frente aos transmissores, ou existências de outras fontes de ruídos. Tais fontes, distorcem o valor da distância entre estações, ocasionando erros expressivos.

Com a introdução destes ruídos, surgiu a necessidade de adição de novas correções, com o intuito de conseguir resultados menos deturpados. Neste trabalho, será portanto aplicado um sistema de votação para averiguar quais parâmetros de distâncias precisam ser corrigidos, utilizando a distância euclidiana entre âncoras como padrão de avaliação e correção, como descrito na Seção 4.4.3 deste capítulo.

4.4.2 Método para definição de desvanecimento de larga escala

Como destacado na Seção 3.1.2 e ao longo da seção anterior, um sinal é atenuado a medida que se desloca pelo ambiente, diminuindo sua intensidade até chegar em um receptor ou não ter intensidade suficientes para ser percebido por outros dispositivos. Como relatado, a perda de intensidade é influenciada pela permissividade do ambiente a propagações de sinais, a qual é modelado de controlado pelo parâmetro do desvanecimento de larga escala (η).

Como pode destacado por Sklar (2001), normalmente é endereçado o valor de 2 para descrever η . Entretanto, η igual a 2 está associado a uma visada direta entre dispositivos em um espaço livre, sendo que para cenários com obstruções com diversas densidades entre equipamentos será necessário ajustes nesse parâmetro (Sklar 2001, Tanghe et al. 2008).

Neste trabalho, é apresentado uma metodologia de estimação do valor de desvanecimento η , que deve ser aplicado para cada uma das estações. Com base nos equipamento já instalados e em suas posições, serão inicialmente coletadas 50 RSSI de cada estação a

cada metro a sua frente, totalizando 10 metros de coleta. Para cada metro, serão descartadas 5 amostras com os maiores valores e 5 com os menores valores de RSSI. A potência referência do modelo corresponderá a média das amostras restantes de RSSI do primeiro metro, enquanto a média das amostras da intensidade do sinal das outras distâncias correspondem a intensidade respectiva para cada distância. Assim, com o uso da Equação (4.2) serão determinados 9 valores de η , e a estimação final do parâmetro η de uma estação corresponderá a média dessas 9 estimações.

$$\eta = \frac{Pr(d_0) - Pr(d)}{10 \log_{10}(d)} \quad (4.2)$$

Na Equação (4.2), tem-se:

- $Pr(d_0)$ como a potência de referência a um metro de distância;
- $Pr(d)$ a RSSI para a distância avaliada;
- d a distância a qual se procura estimar o η ;
- η é parâmetro livre do modelo de de desvanecimento de larga escala, como uma função da posição.

Um exemplo de aplicação do método pode ser observado na Tabela 4.1. Para o exemplo a prática foi aplicada no segundo pavimento do *Instituto Metrópole Digital*, em um caso de visada direta entre dispositivos, com utilização de um transmissor Sensor Tag CC1350 como estação BLE e *Smartphone Samsung Galaxy S4* como receptor móvel.

Tabela 4.1: Definição de η a cada metro, utilizando RSSI de referência de -57,55 dBm, a um metro de distância. η média final 1,71.

Distância	2º m	3º m	4º m
RSSI (dBm)	-67,45	-66,88	-68,23
η	3,29	1,96	1,77
Distância	5º m	6º m	7º m
RSSI (dBm)	-68,77	-68,37	-68,35
η	1,61	1,39	1,28
Distância	8º m	9º m	10º m
RSSI (dBm)	-68,85	-72,07	-70,44
η	1,25	1,52	1,28

Uma curva de intensidade média de potência pode ser observada na Figura 4.4, em comparação com o valor padrão de η igual a 2. Como pode ser observado, o uso de uma intensidade de desvanecimento apropriado ao cenário do transmissor se aproxima na maior parte do percurso ao valor padrão 2 indicado na literatura. Mais detalhes quanto ao experimento apresentado na Tabela 4.1 pode ser encontrado na Seção 5.4.1.

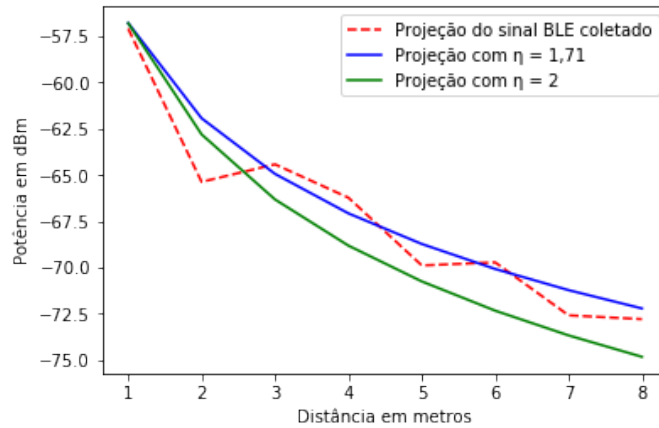


Figura 4.4: Comparação entre η definido pelo método e outras intensidades.

4.4.3 Correção de distância

Mesmo com os métodos de amortecimento de variação de RSSI e definição de η , a estimação de distância entre estações leva a aferir resultados indesejados, e a consequência de uso de dados deturpados são erros na estimação das coordenadas (X,Y) do alvo. Quanto maior o erro na definição das distâncias entre as estações, mais afastadas serão as coordenadas estimadas reais do alvo. Como detalhado na Seção 3.3, um dos resultados que tendem a fornecer erros na estimação da coordenada do usuário são casos com o não existir de ponto comum entre estações, como ilustrado na Figura 4.5.

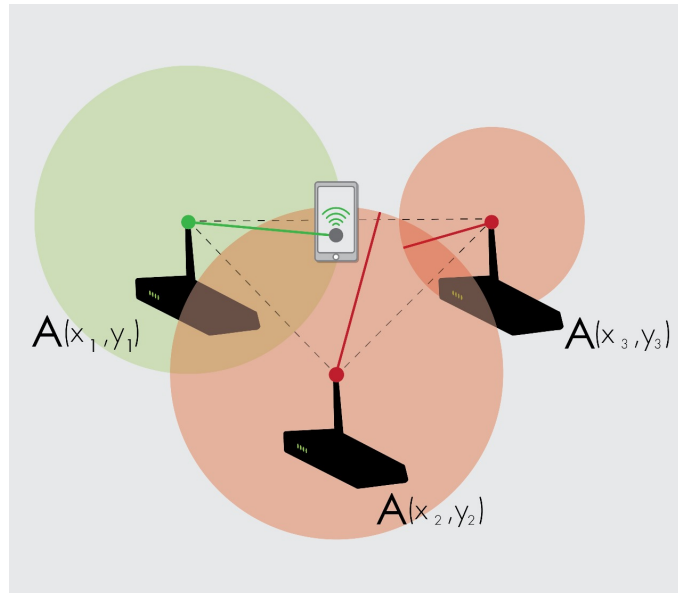


Figura 4.5: Exemplo do não coincidir das circunferências em um ponto comum.

Para mitigar os ruídos, neste trabalho é atribuído uma metodologia de correção do parâmetro de distância entre estações detectadas pelo dispositivo móvel, utilizando um

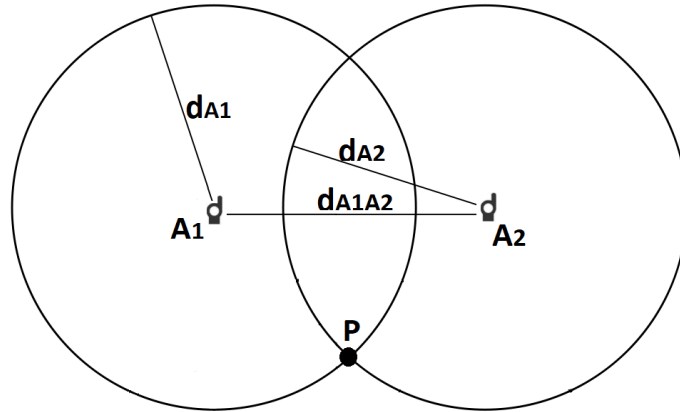


Figura 4.6: Distância entre âncoras e as circunferências centralizadas nas âncoras e com alcance até P.

sistema de votação. O sistema de votação afere a estimação da distância entre estações como inadequada com base na distância euclidiana entre âncoras envolvidas. A distância entre o ponto móvel e a âncora é vista como a representação de uma circunferência ao redor da âncora. Assim como a circunferência toca o ponto móvel ao longo de seu arco, retas formadas entre a âncora da circunferência e outras âncoras também tocam o arco, como representado na Figura 4.6. Desta forma, existe uma aproximação da distância euclidiana formada entre âncoras com as distâncias estimadas destas para o ponto móvel.

Com a diferença angular e espacial entre âncoras, é admitido como aceitável uma margem de 25 % de diferença. Caso a diferença ultrapasse o limite da margem, a distância da âncora avaliada para o ponto móvel recebe um voto de deturpação. Portanto, a avaliação segue como demonstrado no sistema de Equação (4.3):

$$V_n = \begin{cases} V_n, & \text{se } d_{A_n A_I} - d_{A_n} \leq 1,25 d_{A_I} \\ V_n + 1 & \text{se } d_{A_n A_I} - d_{A_n} > 1,25 d_{A_I} \end{cases} \quad (4.3)$$

No sistema de Equações (4.3), tem-se:

- V_n corresponde a variável de votos de incerteza para uma âncora n , com contagem inicialmente nula;
- $d_{A_n A_I}$ é a distância euclidiana entre uma âncora avaliada (n) para uma âncora avaliadora (I);
- d_{A_n} é a distância entre âncora avaliada e dispositivo móvel;
- d_{A_I} distância entre âncora avaliadora e dispositivo móvel.

No método a âncora com menor número de votos de deturpação (V_n) será considerada a referência do grupo. Com base na âncora de referência, as distâncias das âncoras com pelo menos metade dos votos serão corrigidas, a exemplo ilustrado na Figura 4.7, em que $d_{A_{V_n}}$ é a distância da âncora de referência para o dispositivo móvel e $d_{A_{V_n} A_I}$ é a distância euclidiana de uma âncora (I) para a âncora de referência, como segue na Equação:

$$d_{A_I} = d_{A_{V_n} A_I} - d_{A_{V_n}} \quad (4.4)$$

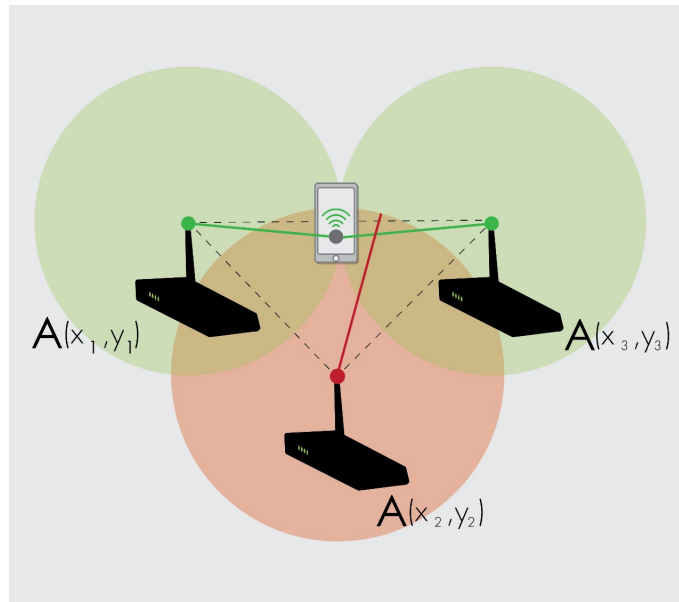


Figura 4.7: Exemplo de Âncora corrigida seguindo a proposta de correção.

Adicionalmente, os transmissores devem possuir um alcance de transmissão de referência, com a limitação do alcance de transmissão baseada na distância entre dispositivos estimada, qualquer estação fora do alcance deve ser descartada. O alcance limite é baseado em quantos metros foram utilizados na determinação de η na Seção 4.4.2, sendo nesse projeto foi considerado até 10 metros.

4.4.4 Trilateração

Com base nas distâncias entre estações adquiridas, a coordenada base derivada dos modelos de propagação de sinais é aplicada ao um sistema de trilateração. Nesta aplicação, a coordenada será determinada com base nas posições conhecidas das estações e nas distâncias estimadas para a estação móvel, representada como a distância euclidiana entre estações fixas e móvel. Assim, é gerado um sistema de equações com duas variáveis (X, Y) que representam as coordenadas desconhecidas do usuário, como demonstrado na Equação (4.5).

$$\begin{aligned} d_{A_1}^2 &= (X - X_{A_1})^2 + (Y - Y_{A_1})^2 \\ d_{A_2}^2 &= (X - X_{A_2})^2 + (Y - Y_{A_2})^2 \\ d_{A_3}^2 &= (X - X_{A_3})^2 + (Y - Y_{A_3})^2 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Na Equação (4.5), são representados:

- X e Y correspondendo as coordenadas desconhecidas do ponto móvel;
- d_{A_n} indica a distância do dispositivo móvel para cada âncora;
- X_{A_n} e Y_{A_n} são as coordenadas das estações âncoras, com n definindo a referência para o ponto 1, 2 e 3.

A computação é aplicada com uso do método dos mínimos quadrados (MMQ), a qual fornecem uma boa aproximação para sistemas de múltiplas leituras. A seção 3.3 apresenta a abordagem completa do sistema de trilateração aplicada com o método MMQ.

Durante a coleta de dados no ambiente, poderá existir momentos com um grande número de âncoras alcançáveis, neste caso, o método prevê a geração de vários grupos de três âncoras. A coordenada final no momento de atualização K , será uma média das coordenadas gerados pelos vários M grupos de 3 âncoras formados, como segue na equação (4.6):

$$\begin{bmatrix} X_{(K)} \\ Y_{(K)} \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \begin{bmatrix} X(i) \\ Y(i) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Ao final, o método da trilateração fornece uma coordenada espacial do usuário, entretanto, esta coordenada poderá estar afetada pelos distúrbios associados a transmissão dos sinais, como destacados na Seção 3.3. Mesmo com aferições deturpadas, esta coordenada é útil como referência para ser aplicada junto às coordenadas geradas pelos sistemas inerciais, gerando assim, um sistema híbrido de localização.

4.5 Coordenadas por sistemas inerciais

Ainda durante o período de tempo de atualização de coordenadas K , o usuário estará se deslocando pelo ambiente. Durante o trajeto, o usuário marcha de um local de partida até o seu destino com o smartphone em sua mão. A medida que marcha, a mão do usuário oscila em movimentos verticais, o que ocasiona a mudança da aceleração de sua mão durante os passos.

Com base na característica da marcha humana ser constituída de movimentos periódicos e notáveis (Lan & Shih 2013), a identificação da marcha pode ser identificada por oscilações periódicas da aceleração, como detalhado na Seção 3.4.4. Com base nessa observação, o método emprega um detector de passos utilizando leituras do acelerômetro embarcado no smartphone, com o objetivo do passo ser o momento de atualização de coordenadas.

A movimentação do usuário pelo ambiente também possui a mudança de sentido ou orientação de deslocamento. A orientação é entendida como a direção do deslocamento dentro da representação das coordenadas do eixo cartesiano, atendendo casos do deslocamento vertical e horizontal do mapa. O sentido de orientação do dispositivo pode ser aferido por meio de uma bússola, que indica a direção do dispositivo em relação ao norte magnético do planeta. Para a tarefa do rastreamento da direção do usuário no ambiente é utilizado o sensor orientação, que atuará como a bússola do sistema.

Ao final, o método utilizará dos dados aferidos pelas soluções propostas e atualizará as coordenadas. O sistema adotado para a atualização de coordenadas inerciais é o método PDR, que registra a movimentação do usuário em forma de mudança de pontos de um plano cartesiano. Assim, segue nas próximas seções tratam das respectivas soluções propostas neste trabalho, com uso das leituras dos sensores por meio do sistema operacional *Android* e suas respectivas ferramentas.

4.5.1 Detector de passos

Para o detector de passos é utilizada a observação da mudança na aceleração linear utilizando o acelerômetro. O Acelerômetro é um sensor desenvolvido para rastreamento de mudanças de aceleração linear e detalhes quanto suas funcionalidades estão presentes na Seção 3.4.1. Um passo humano obedece uma ocorrência periódica de movimentação, alcançando momentos de picos em sua aceleração durante o momento em que o corpo é erguido durante o ato do passo e em seguida no movimento de repousar após o passo, alcançando uma aceleração no sentido contrário a anterior.

Apesar da possibilidade de identificação de um passo ser possível a partir de picos de aceleração, os movimentos involuntários do usuário e ruídos de leitura do sensor tendem a fornecer falsos picos, que faz que a identificação dos passos não ocorra como esperado, contando mais ou menos passos que a ocorrência real. Assim como abordado na Seção 3.4.4, será considerado um sistema de detecção de passos com base em valores de referência de aceleração que sejam capazes de identificar um passo. Os valores referenciais de aceleração obedecem uma ordem de magnitude iguais e de direções contrárias, que devem ocorrer em um período de tempo entre 100 e 400 *ms*, tempo médio de ocorrência de um passo humano em uma marcha. Sendo assim, o método utiliza valores de referência que condizem com as leituras do sensor acelerômetro empregado, como demonstrado a seguir.

São realizadas 3 caminhadas seguindo o mesmo percurso, sendo registradas as leituras do acelerômetro durante o trajeto. Como relatado anteriormente, o rastreamento de um passo parte da verificação de ocorrência de valores de referência de aceleração no período de tempo especificado. Assim, são verificados quais valores de aceleração representam melhor a detecção da ocorrência de um passo. Na Tabela 4.2 estão registrados 4 dos testes empíricos para a definição dos valores de referência para detecção de passos. Os testes variaram ao longo de uma margem de valores de referência de 0 até 10 com afastamento de 0,5 na aceleração de referência. Seguindo os testes indicados na Tabela 4.2, o melhor valor de referência indicado é 0,55, demonstrando uma menor quantidade de erros na detecção de passos.

Tabela 4.2: Determinação do valor de aceleração de referência por meio do menor número de erros de detecção de passo em 3 caminhadas (*Cam.*) e no menor erro médio da contagem de passos.

Aceleração de referência	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Média de erro
0,45	35	33	28	3,3
0,50	33	31	28	2
0,55	31	28	30	1
0,60	32	27	28	2,3

4.5.2 Sensor Orientação

A direção fornecida por uma bússola é indicada com base no fluxo magnético existente nas proximidades do dispositivo, em especial fluxo causado pelo norte do planeta. Este fluxo pode ser rastreado inicialmente com base no uso de um magnetômetro, que é sensor capaz de rastrear o fluxo magnético no planeta. Detalhes sobre o magnetômetro são encontrados na Seção 3.4.2.

Em uso conjunto do magnetômetro com o acelerômetro, é gerado o sensor orientação, que possui entre suas estimativas, o chamado ângulo Azimute. Este ângulo é uma abertura angular, cujo valor em graus descreve um arco com origem no norte geográfico até a projeção do alvo com o horizonte. O sensor, por meio do ângulo azimute, atua potencialmente como a bússola do sistema. A aquisição dos dados do sensor orientação são derivados da lista de eventos dos sensores do sistema operacional Android, embarcado na plataforma utilizada neste trabalho.

Entretanto, a informação fornecida pelo sensor orientação fornecem ângulos em relação ao polo magnético, o que para o plano de representação cartesiano atual será um *offset* na leitura. Dessa forma, sendo necessário a extração do valor acrescido nos dados, fornecendo assim o ângulo efetivo de direcionamento do alvo no plano de localização durante o movimento. A retirada se faz com base na diferença do novo ângulo fornecido para a leitura anterior. Mais informações sobre o sensor orientação são encontradas na Seção 3.4.3.

4.5.3 PDR

A atualização das coordenadas do sistema inercial se faz com uso de um método convencional, chamado de *Pedestrian Dead Reckoning* (PDR), o qual é baseado no método *Dead Reckoning Navigation*. O método se baseia na movimentação de um ponto em um mapa cartesiano, atualizando as coordenadas por meio de um deslocamento e por um ângulo de orientação.

O método PDR portanto fornecerá as coordenadas do sistema inercial baseado na ocorrência de deslocamento. A cada detecção de passo, será adicionado as coordenada (X, Y) atuais um dado deslocamento de 70 cm em suas atuais posições, com o deslocamento baseado na distância percorrida por um passo humano, como discutido na Seção 3.4.4. O método possui uma boa precisão associada a detecções de passos a curto prazo, mas a longo prazo, o método se mostra falho, parte da causa devido a precisão associadas aos sensores e também associado a distância percorrida por um passo humano não ser exata. De qualquer maneira, o método fornece uma variação mais precisa para a atualização da coordenada do que os sistemas baseados em rede.

As coordenadas do método acompanham o tempo de atualização de coordenada do sistema híbrido. Ao longo das janelas de tempo formadas entre atualizações, o método acumula todas as atualizações ocorridas durante a detecção de passo, fornecendo ao final do tempo de atualização do sistema híbrido apenas a coordenada final ao longo do tempo de atualização, a ser usada para criação da coordenada da solução híbrida.

4.6 Geração da coordenada híbrida

Com a estimação das coordenadas pelos outros métodos, tem-se os dados necessários para geração da coordenada híbrida, resultante da interpolação de suas bases. No modelo, utiliza-se como resultado geral da metodologia empregada a coordenada estimada do usuário, que tem sua geração de resultados associado a atualização simultânea de cada um dos outros métodos.

Uma característica associada ao método híbrido está ligado às vantagens associadas aos outros métodos, como geração de coordenada com menor erro semelhante ao sistema inercial e a não dependência de um ponto de referência inicial, como a solução do sistema baseado em redes. A ferramenta empregada na geração híbrida, bastante popular na área de rastreamento e correção de dados, é o Filtro de Kalman. Esta ferramenta possui a capacidade de interpolar dados de mesma unidade e corrompidos por ruídos brancos aleatórios.

4.6.1 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman (FK) é uma ferramenta capaz de computar estimativas de estados instantâneos, utilizando uma combinação entre um sistema dinâmico e um dado fornecido por sensor ou observador. Neste, os dados utilizados estão influenciados por ruídos brancos gaussianos, que interferem na contribuição de cada método para uma dada estimação resultante. Uma visão geral sobre o FK está descrita na Seção 3.5, mas, de forma geral o filtro e sua aplicação ao modelo, utiliza dois grupos de equações para geração das coordenadas híbridas, estando os grupos divididos em: grupo de predição e grupo de atualização.

O sistema híbrido possui como estados para a implementação do FK as Equações (4.7), utilizando como dinamismo do sistema as coordenadas do sistema inercial e como estado observado os dados do sistema baseado em redes.

$$\begin{aligned}\hat{X}_{(K)} &= A.\hat{X}(K-1) + B.u_{(K)} \\ Y_{(K)} &= C.\frac{1}{M}\sum_{i=1}^M Trila(X_M, Y_M)\end{aligned}\quad (4.7)$$

Compondo a Equação (4.7):

- n são o número de eixos de coordenadas do sistema de localização, representado neste trabalho como 2;
- M representa o número de grupos de 3 âncoras encontrados;
- A , B e C são matrizes identidades $n \times n$, com a indicação de n para o número de dimensões do sistema de coordenadas;
- Com $\hat{X}_{(K)}$ corresponde ao sinal de interesse do FK, contendo as coordenadas $(X_{(K)}, Y_{(K)})$ no instante de tempo K , possuindo dimensões $n \times 1$;
- $u_{(K)}$ descreve a transição das coordenadas (X, Y) entre os estados anterior e atual, fornecida pelo método PDR, possuindo dimensões $n \times 1$;
- $Y_{(K)}$ gera coordenadas (X, Y) derivadas da trilateração (*Trila*), possuindo dimensões $n \times 1$.

A variação de $u_{(K)}$ é fornecida pela transição de coordenadas por meio do PDR. Portanto, $u_{(K)}$ pode ser representado como em (4.8):

$$u_K = \begin{bmatrix} \delta(x_{(K)}) \\ \delta(y_{(K)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{(K)}) \\ \sin(\theta_{(K)}) \end{bmatrix} \cdot d_K \quad (4.8)$$

Sendo representado em (4.8):

- $\delta(x_{(K)})$ é a variação no eixo X no instante K;
- $\delta(y_{(K)})$ é a variação no eixo Y no instante K;
- $\theta_{(K)}$ a variação da orientação do usuário no instante K;
- d_k distância percorrida por um passo.

No grupo de predição, os resultados do método PDR (u_K), derivado dos sistemas inerciais, são utilizados como sinal de interesse ($\hat{X}_{(K)}$), que devem ser atualizados na fase de atualização das coordenadas no FK, adentrando os dados por meio da referência, em dado momento de atualização K .

Durante o grupo de atualização, o sinal de referência é atualizado por meio do chamado ganho do Filtro de Kalman. Neste, a contribuição da informação do PDR é reavaliada, baseada agora na leitura do estado de observação, representado no método deste trabalho como as coordenadas geradas na trilateração ($Y_{(K)}$). Ao final, com as leituras sendo atualizadas a um estado a posteriori, com as coordenadas híbridas retiradas do FK, identificando a coordenada estimada atual do alvo.

De forma geral no FK, o ganho de Kalman representa a contribuição de cada método (PDR e trilateração) na fusão de dados. O controle do ganho é aferido por meio dos ruídos gerados nas coordenadas de cada método. Quanto menor intensidade do ruído atrelado a trilateração em relação ao ruído do PDR, mais confiáveis serão as coordenadas geradas pela trilateração, assim como a contribuição inversa para mais confiança do PDR. Os valores associados a contribuição de cada método são obtidos de forma empírica, estando abordados na Seção 5.4.4.

Capítulo 5

Experimentos e análise de resultados

Neste Capítulo são discutidos a implementação e os resultados da metodologia para o sistema híbrido de localização indoor.

5.1 Descrição do ambiente de testes

Como descrito no Capítulo 4, a formulação de um sistema de localização *indoor* inicia por avaliar o ambiente da instalação e os equipamentos utilizados. Como tal, o ambiente a ser utilizado para a avaliação da metodologia proposta foi o segundo pavimento do Instituto Metrópole Digital, nas áreas correspondentes ao *Hall*,  rea de acesso à escada e corredores próximos, resultando em um total de 300 m^2 de  rea. O ambiente é composto por cadeiras e mesas espalhadas pelo local, próximo às paredes e de elevadores,  l m dessas estruturas, ocorria a passagem de pessoas no local, com aproximadamente 40 pessoas em momentos de fluxo e presença de 15 pessoas no ambiente em outros momentos. Na Figura 5.1   ilustrada a planta baixa do local, junto às localizações dos dispositivos. Todos os dados utilizados foram coletados em testes nos dias 26/01/2018 e 01/02/2018. Nos dias, foram coletados os dados de RSSI das âncoras instaladas no local e das leituras dos sensores inerciais do dispositivo.

5.2 Hardware utilizado e localização das  ncoras

Com base no local de instalação, foram utilizados pelo sistema duas estações Wi-Fi e 4 estações BLE devidamente instaladas no local, totalizando 6 estações como âncoras para o sistema. As 6  ncoras possuem como detalhes em sua composição:

- 4 *SensorTag CC1350*: estes dispositivos possuem processador *Cortex -M3* com arquitetura *ARM * de 32 bits, com conectividade por meio de *Bluetooth Low Energy*, com baixo consumo de bateria. O dispositivo ainda conta com 10 sensores de baixa potência, para medições de moviment  o, temperatura, umidade, pressão, luz, campo magnético e som;
- 2 estações *Cisco Aironet 1040*: utilizado pontos de acesso com transmissão por meio do padrão *IEEE 802.11n*. As estações transmitem sinais por meio de uma



Figura 5.1: Segundo pavimento do Instituto Metrópole Digital, e as posições das estações Wi-Fi e BLE.

relação de antenas 2 X 2 para múltiplas entradas e múltiplas saídas. Tem capacidade de transmissão em 2,4 e 5 GHz;

- Foi utilizado como plataforma para embarque do aplicativo de coleta de dados o Smartphone Samsung Galaxy S4. O aparelho conta com um processador Quad-core 1,9 GHz, 16 GB de memória, capaz de acessar redes Wi-Fi pelas versões do padrão 802.11 a/b/g/n/ac, e comunicação com Bluetooth 4.0 nas versões LE/EDR/A2DP. Possui um sistema de sensores, compondo: acelerômetro; proximidade; giroscópio; bússola; bar metro; temperatura; umidade; gesto.

As estações âncoras foram dispostas pelo ambiente como ilustrado na Figura 5.1. A escolha de suas posições partiu da disponibilidade de acomodação dos dispositivos, com adição da condição de distância entre estações de: ao menos 5 metros de uma estação para uma próxima e não mais que 10 metros para uma segunda estação; as estações Wi-Fi já estavam instaladas no ambiente, sua localização estava no teto do local, a 2,6 metros de altura; as estações BLE utilizaram um padrão de altura de 0,8 metro.

5.3 Estrutura dos dados

Com base no ambiente da instalação e a posição dos equipamentos, se faz necessário a descrição da coleta e estrutura dos dados. Para embarque da aplicação, foi utilizado como plataforma o Samsung Galaxy S4, com dados coletados por meio de um aplicativo gerado pelo grupo de pesquisa. Os dados coletados seguem os formatos de *data frame*, com a estruturação indicada por seu cabeçalho. Para o *data frame* correspondente aos dados dos sensores inerciais, são coletados: *timestamp*; identificação do sensor, composto por: acelerômetro; magnetômetro; sensor orientação; leitura do sensor. O cabeçalho tem sua composição representada na Figura 5.2

Timestamp	Sensor	Leitura do sensor
-----------	--------	-------------------

Figura 5.2: Formato do cabeçalho dos sensores inerciais.

A coleta de dados das âncoras seguem de forma semelhante, por meio do formato de um *data frame*. O arquivo utiliza: *timestamp* da leitura; *mac address* para identificação da estação; e a RSSI da sinalização do dispositivo. Seu formato de dados segue como ilustrado na Figura 5.3.

Timestamp	MAC Address	RSSI
-----------	-------------	------

Figura 5.3: Formato do cabeçalho das coleta de RSSI das âncoras.

Os dados das âncoras são inicialmente cruzados com um terceiro *data frame*, composto por informações sobre as estações conhecidas. Neste quadro são registrados todas informações relevantes as redes âncoras do sistema, utilizando no cabeçalho: *mac address*; potência de referência da âncora; η (parâmetro do modelo de desvanecimento de larga escala); posição (X,Y) da âncora no plano representativo. O formato do *data frame* da coleta de RSSI é representado na Figura 5.4.

MAC Address	Potência de referência	η	Posição (X,Y)
-------------	------------------------	--------	---------------

Figura 5.4: Formato do cabeçalho das âncoras conhecidas.

5.4 Experimentos e análise de resultados

Ao longo desta Seção são apresentados os resultados do experimento utilizando a metodologia proposta. Os experimentos seguem a partir de uma análise inicial das soluções propostas e uma comparação dos resultados das soluções apresentadas com as soluções clássicas. As seções seguintes são compostas de experimentos para seleção e sintonia dos parâmetros de atualização de coordenada (5 segundos) e os parâmetros R (1) e Q (0,38) do Filtro de Kalman. Ao final, será demonstrado o impacto da área de cobertura das âncoras nos resultados e indicação de solução da proposta.

Assim, ao longo das próximas subseções, são relacionados os seguintes experimentos:

- Análise da propagação do sinal utilizando o η estimado pela metodologia proposta. É avaliado o erro em metros da estimação da proposta em relação ao afastamento real entre estações;
- Comparação da trilateração em sua forma base com aplicação do sistema de correção de distância proposta. A avaliação segue como um comparativo das duas formas de trilateração, relativo ao erro (em metros) da posição estimada para a posição real;

- Comparação entre os resultados da metodologia proposta, PDR e trilateração em relação a posição com posição real do usuário no final de um trajeto, semelhante a avaliação de Röbesaat et al. (2017);
- Análise do comportamento do método quanto a mudança dos parâmetros R e Q no Filtro de Kalman, utilizando referências encontradas na literatura em comparação aos testes com valor indicado na proposta;
- Impactos nos resultados dos métodos utilizando diferentes tempos de atualização de coordenada;
- Análise dos resultados do método com diminuição no número de âncoras e área de cobertura.

5.4.1 Avaliação da distância entre estações

Na análise inicial do projeto, um dos dados necessários para a execução da metodologia é a definição da intensidade do desvanecimento de larga escala. Para a execução dos testes são executados os passos mencionados na Seção 4.4.2, com a coleta de dados de cada uma das âncoras. Após a instalação das âncoras no ambiente, são coletados as RSSI de cada uma das âncoras em cada metro a frente das mesmas, no total de 10 metros de distância. Na Figura 5.5 está apresentado um histograma como exemplo de 9 metros de uma das âncoras de uma estação BLE.

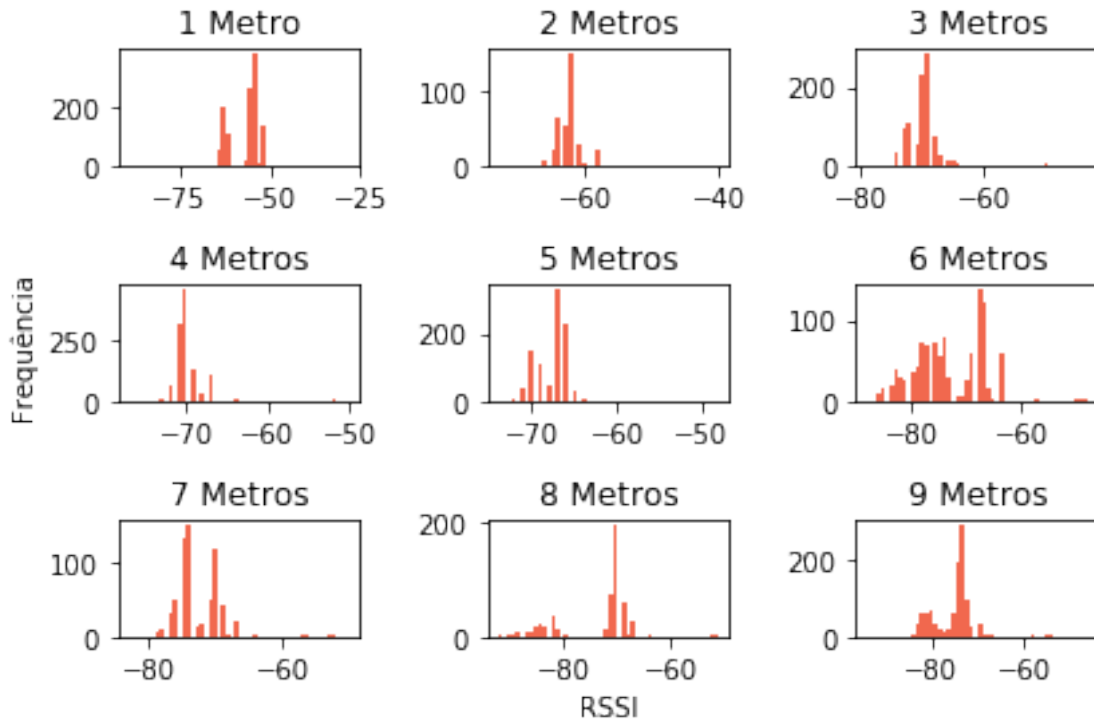


Figura 5.5: Histograma das RSSI em cada metro de distância de uma estação.

Com uso da Equação (4.2) e as orientações da Seção 4.4.2, é definida a intensidade de η para cada metro a frente da estação, utilizando o primeiro metro como potência d

referência e a média das 9 indicações restantes de η como parâmetro de desvanecimento da estação. Na Tabela 5.1 está registrado a indicação de intensidade de η para cada uma das estações, bem como suas posições no ambiente.

A avaliação de comparação do método segue com análise do erro de distância entre afastamento real entre âncora e receptor e distância estimada. Para a avaliação, será utilizado a distância de alcance avaliada no método de desvanecimento (10 metros). Assim, é utilizado como base de dados a distância escolhida para avaliação de 5 metros e 50 amostras de RSSI para cada âncora. A análise dos erros mínimo, médio e máximo de cada âncora está registrado na Tabela 5.2.

Como pode ser observado, o erro médio das âncoras demonstra uma boa aproximação da estimação pelo método, com erros inicialmente associados a necessidade de mais amortecimento das variações do desvanecimento rápido. Como pode ser observado na Figura 5.5, existe a tendência da média nula na variável de desvanecimento rápido, mas nem sempre as amostras se aproximam da gaussiana de média nula, o que ocasiona em uma menor efetividade do sistema de amortecimento. Entretanto, em função do erro máximo, para alguns casos será necessário realizar a correção da distância entre âncora e receptor móvel. Em todos os testes com trilateração discutidas nas próximas Seções são utilizadas as intensidades de η registrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Definição de η de todas as estações âncoras e suas coordenadas cartesianas.

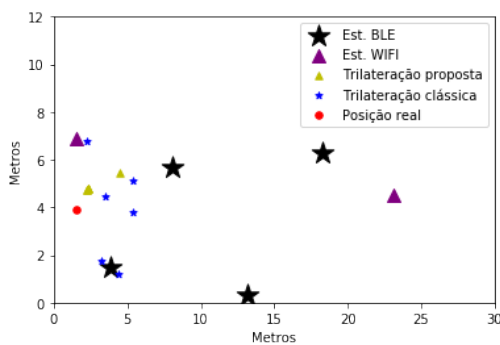
	Âncora 01	Âncora 02	Âncora 03
Padrão	WIFI	WIFI	BLE
η	2,43	2,12	1,71
X,Y	23,1 ; 1,5	1,5 ; 6,9	3,9 ; 1,5
	Âncora 04	Âncora 05	Âncora 06
Padrão	BLE	BLE	BLE
η	1,61	1,53	1,68
X,Y	8,1 ; 5,7	18,3 ; 6,3	17,7 ; 0,9

Tabela 5.2: Erros de estimação (em metros) máximo, médio e mínimo em 5 metros de distância para cada âncora.

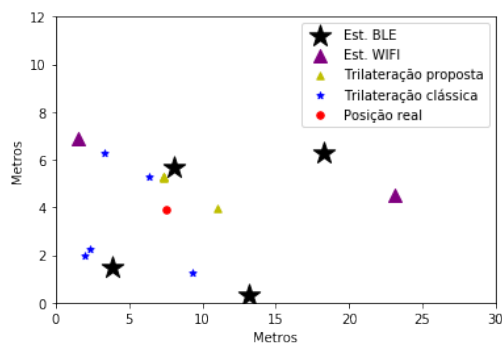
Método	Máximo	Mínimo	Média
Âncora 01	1,921 m	0,923 m	1,721 m
Âncora 02	1,351 m	0,965 m	0,839 m
Âncora 03	1,302 m	0,617 m	0,817 m
Âncora 04	1,452 m	1,021 m	1,251 m
Âncora 05	2,351 m	1,421 m	1,882 m
Âncora 06	1,236 m	0,659 m	0,789 m

5.4.2 Método convencional de Trilateração X Trilateração com correção de âncoras

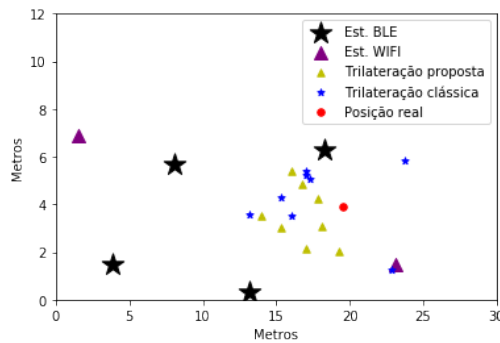
Nesta seção, é realizado um teste para verificar a efetividade do método de correção de distância na trilateração, com a comparação de desempenho da solução de correção em relação ao método tradicional. A atualização da coordenada em cada método ocorre a cada 5 segundos, em um total de 20 amostras. No teste, são avaliados 3 pontos ao longo do ambiente, e cada método expressa seus resultados em relação a uma dada posição real. Nas Figuras 5.6(a), 5.6(b) e 5.6(c) são ilustrados algumas respostas do sistema em cada posição de referência.



(a) Primeira posição e posição estimada pelos métodos.



(b) Segunda posição e posição estimada pelos métodos.



(c) Terceira posição e posição estimada pelos métodos.

Figura 5.6: Exemplo de estimação de distância entre método tradicional e proposto de trilateração em três pontos diferentes.

Em observação dos resultados apresentados na Figuras, o método de correção da distância das estações demonstrou ser uma ferramenta de aprimoramento para a trilateração. Nos testes, os resultados do experimento com correção da distância entre estações proporcionou um aperfeiçoamento na resposta da trilateração, fornecendo uma coordenada mais próxima do método sem correção na maioria dos casos. Em uma análise de efetividade em termos de erro (em metros), baseado na distância euclidiana da posição estimada por cada método para a posição real do usuário, têm-se os resultados da Tabela 5.3, com

registros dos erros máximo, médio e mínimo de cada método ao longo dos três testes. Como pode ser observado nos testes apresentados, a proposta de correção atuou com efetividade, aproximando a coordenada estimada da posição real em 85% dos casos das 20 amostras.

Tabela 5.3: Erros (em metros) máximo, médio e mínimo da posição dos métodos de trilateração para uma posição real.

Método	Máximo	Mínimo	Média
Trilateração base	7,586 m	3,372 m	5,114 m
Trilateração com sistema de correção	5,872 8 m	1,25 m	2,767 m

5.4.3 Comparação entre o método proposto e os modelos base

A avaliação do método proposto segue com um comparativo de desempenho entre os resultados da proposta com os resultados dos outros métodos isolados. Nesta avaliação, um usuário portando a plataforma em sua mão segue por um dado caminho, com coordenada de origem e destino conhecidos. Com os dados coletados pelo dispositivo, cada método irá gerar uma coordenada a cada 5 segundos, formando um trajeto que segue ilustrado Figura 5.7.

Em uma análise inicial, é observado o afastamento do método PDR em relação ao trajeto real do usuário ao longo do trajeto estimado. Entretanto, ao associar os dados da Trilateração, mesmo com menor precisão, recondiciona a direção do rastreamento do trajeto.

Em uma análise mais complementar, é analisado o desempenho dos métodos pela precisão, comparando a distância euclidiana entre a coordenada real e a coordenada estimada de cada formulação. Na avaliação, foram levantados dados de 20 trajetos, idênticos aos da Figura 5.7, utilizando como parâmetro avaliativo a posição final do usuário no trajeto. Nos testes, foram utilizados uma atualização de coordenada a cada 5 segundos, com uso dos parâmetro do filtro de Kalman: R igual a 1 e Q igual a 0,38. Ao final, são levantados os erros máximo, mínimo e médio de precisão (em metros) de cada método, registrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Erros de estimação (em metros) de cada metodologia.

Método	Máximo	Mínimo	Média
Trilateração	5,872 m	1,258 m	2,767 m
PDR	4,216 m	0,801 m	2,384 m
Proposta	3,188 m	0,417 m	1,224 m

Como pode ser observado, o método proposto demonstra uma melhor aproximação das coordenadas geradas em comparação aos outros métodos. O método PDR possui um

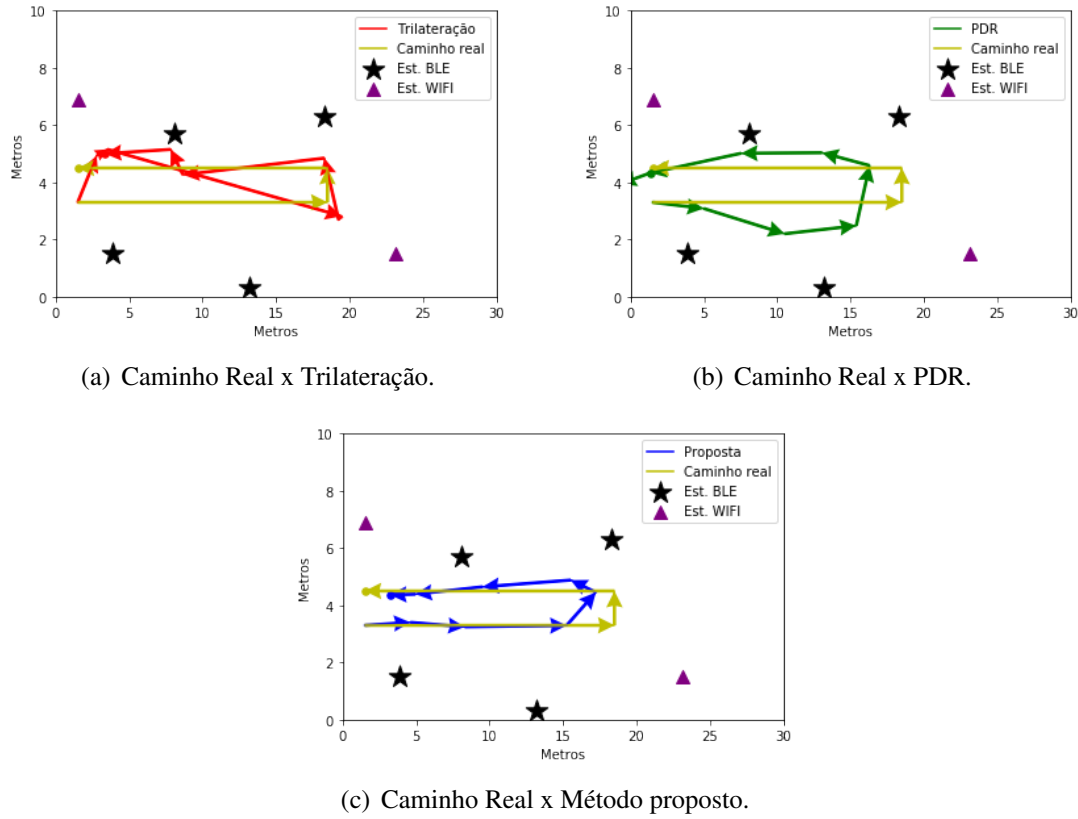


Figura 5.7: Resultado de cada um dos métodos em relação ao caminho real.

menor erro a curto prazo, entretanto os erros acumulativos deturpam o posicionamento real do alvo. Embora apresente menor precisão, a trilateração fornece novos referenciais para utilização no método proposto. A combinação dos dados resultam em estimções das coordenadas do alvo mais próximas do caminho real em 75% dos casos em relação aos dois modelos. Nos outros casos, 5% dos resultados indicam melhores resultados quanto a trilateração e 20% estão associados ao PDR. Uma vantagem a ser destacada do método em relação a outras metodologias descritas na Seção 2, está quanto aos esforços de recalibração, com a não necessidade de projetar um mapa de RSSI do ambiente, principalmente em grandes granularidades. No método existe apenas a necessidade de atualização das coordenadas das âncoras e seus parâmetros em situações de mudanças do ambiente.

Nas próximas Seções deste capítulo estão registrados os testes de Sintonia do projeto, investigando como determinar os melhores valores de tempo de atualização de coordenadas e parâmetros do Filtro de Kalman, bem como demonstrar porque da seleção dos valores de 5 segundos para atualização de coordenadas e R igual a 1 e Q igual a 0,38. Ao final, será demonstrado a influência da área de cobertura das âncoras e seus impactos nos resultados.

5.4.4 Sintonia do Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman tem como função a combinação dos métodos por meio de suas coordenadas, proporcionando um resultado formado por proporções das coordenadas de base. O controle de proporção ocorre por meio dos parâmetros R e Q do filtro de Kalman, que descrevem os ruídos atrelados aos métodos. A determinação de R e Q partem de investigações baseadas em testes empíricos, seguindo como orientação inicial, as indicações de Röbesaat et al. (2017) para R igual a 1,25 e Q igual a 0,005. Na tabela 5.5 estão registrados algumas das definições de R e Q , baseadas no comportamento do método utilizando uma atualização de coordenadas em 5 segundos, com base em um total de 20 amostras. Nos registros da tabela estão demonstrados os erros máximo, mínimo e médio de amostras da distância euclidiana da posição real do usuário no final do trajeto para a posição estimada pelo método.

Tabela 5.5: Erro mínimo, máximo e médio da metodologia com alteração dos valores de R e Q .

$R = 1,25$ e $Q = 0,005$			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Proposta	2,479 m	0,827 m	1,658m
$R = 1$ e $Q = 0,05$			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Proposta	3,786 m	0,807 m	1,803 m
$R = 1$ e $Q = 0,5$			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Proposta	6,414 m	0,218 m	2,316 m
$R = 1$ e $Q = 0,38$			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Proposta	3,168 m	0,417 m	1,1224 m
$R = 0,1$ e $Q = 0,38$			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Proposta	6,924 m	1,315 m	3,576 m

Entre os testes realizados, os valores indicados para R igual a 1 e Q igual a 0,38 demonstram uma melhor sintonia para a aplicação, em comparação a outros valores testados. As diferenças dos parâmetros R e Q fornecem o nível de confiança do sistema em cada uma das coordenadas base do sistema. Os casos em que os valores de Q eram muito menores em relação a R forneceram resultados muito próximos ao PDR. No caso contrário, casos com R menor que Q aproximam a coordenada final da trilateração. Portanto, uma aproximação entre os valores de R e Q indicaram melhores resoluções se comparado aos casos anteriores, como pode ser observado nas Figuras 5.7(a), 5.7(b) e 5.7(c).

5.4.5 Escolha do tempo de atualização de coordenada

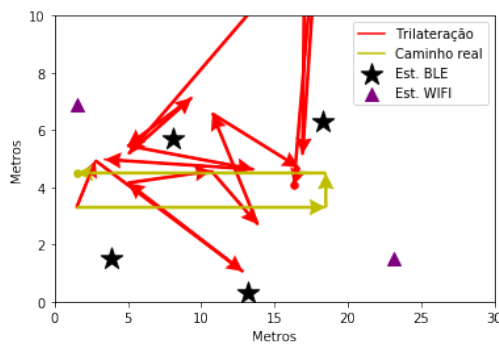
Nesta seção são demonstrados os impactos na taxa de atualização de coordenada nos métodos da trilateração e metodologia proposta. Os impactos avaliados serão as respostas dos métodos utilizando diferentes margens de tempo, variando de 2 até 7 segundos, todos utilizando os valores de Filtro de Kalman com R igual a 1 e Q igual a 0,38. Os testes realizados utilizam como cenário os parâmetros padrões do experimento da Seção 5.4.3 para desvanecimento e atualização. Utilizando como base a posição final do deslocamento, o erro baseado na distância euclidiana dos métodos para a posição real do usuário. Os dados relativos aos erros mínimo, máximo e médio para cada faixa de tempo podem ser visualizados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Erro mínimo, máximo e médio dos métodos com mudança de taxa de atualização.

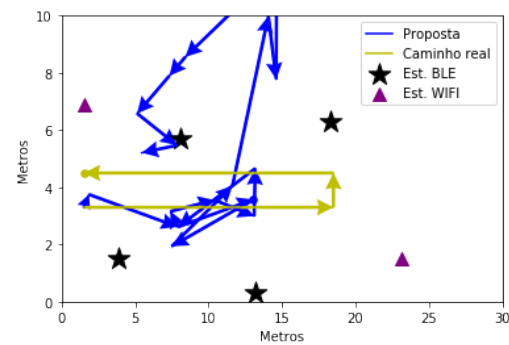
Tempo de 2 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	11,737 m	2,179 m	6,849 m
Proposta	10,465 m	3,167 m	5,814m
Tempo de 3 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	14,549 m	2,217m	9,123m
Proposta	10,408 m	2,973m	5,899m
Tempo de 4 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	13,015 m	2,316 m	7,879 m
Proposta	8,485 m	1,095m	5,242 m
Tempo de 5 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	5,872 m	1,258 m	2,767 m
Proposta	3,168 m	0,417 m	1,1224 m
Tempo de 6 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	13,307 m	2,109 m	5,179 m
Proposta	6,857 m	0,632 m	3,189 m
Tempo de 7 segundos			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	5,962 m	1,848 m	3,806 m
Proposta	4,011 m	0,251 m	2,475 m

As resoluções dos métodos com mudança da taxa de atualização de 5 segundos podem ser observados na Figura 5.8, com exemplificação das resoluções para 2, 4 e 6 segundos. Como observado na Tabela 5.6, a melhor resolução de atualização a ser indicada é a de 5 segundos, fornecendo o menor erro médio. Com a margem de tempo para coleta de dados selecionada, o sistema é capaz de utilizar uma quantidade de amostras suficiente para

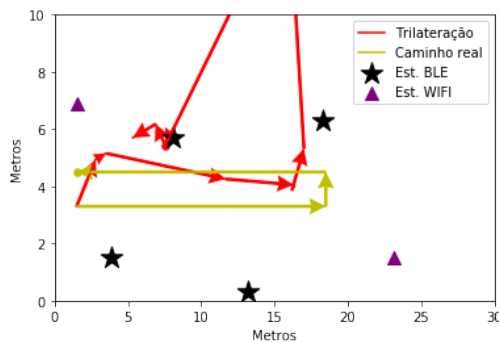
encontrar a média de RSSI que mais se aproxima do valor de intensidade do sinal esperado para a distância. Entretanto, ao tratar da relação de um sistema móvel, as amostras de RSSI serão formadas por leituras de posições diferentes do plano, a qual formam casos de LOS e NLOS entre as leituras, o que ocasiona na perda de efetividade da média se utilizado com tempos de coleta elevados, portanto os grupos de amostras maiores que 5 segundos introduzem erros associados ao tempo de coleta.



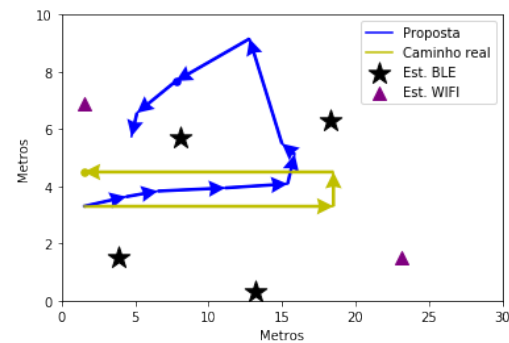
(a) Atualização de 2 segundos na trilateração.



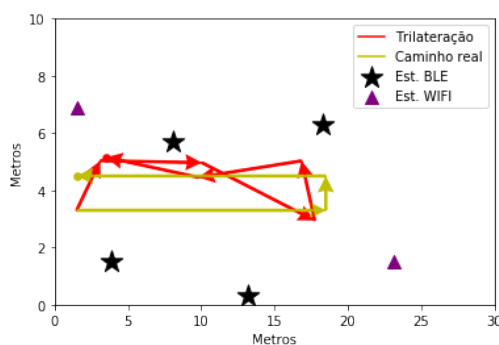
(b) Atualização de 2 segundos na proposta.



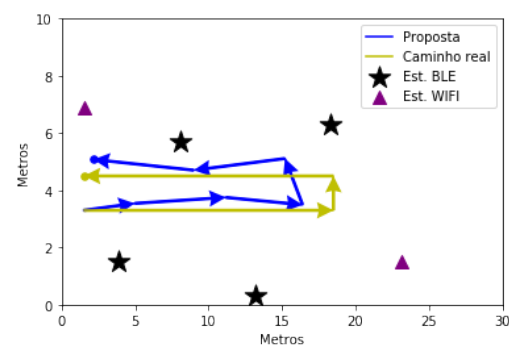
(c) Atualização de 4 segundos na trilateração.



(d) Atualização de 4 segundos na proposta.



(e) Atualização de 6 segundos na trilateração.



(f) Atualização de 6 segundos na proposta.

Figura 5.8: Impacto da alteração da atualização das coordenadas nos métodos da trilateração e método proposto.

5.4.6 Impacto pelo quantitativo de âncoras

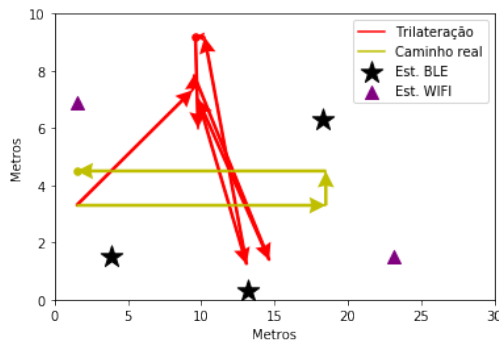
Um dos fatores de impacto na execução do sistema está associado a área de cobertura dos transmissores. Dentro da instalação, foram utilizados 6 transmissores, 2 dos padrões *Wi-Fi* e 4 estações *BLE*, espalhadas ao longo da área de experimento do *Hall*. Uma boa cobertura das âncoras é um fator importante na confiança da geração de coordenadas da trilateração, por fornecer um maior caso de LOS entre estações. Entretanto, quando o usuário se aproxima de regiões com uma quantidade menor de âncoras, as coordenadas geradas pelo sistema da trilateração tendem a sofrer maiores deturpações. Os ruídos são introduzidos pela menor quantidade de referências, o que induz o receptor móvel a estar associado a um menor número de âncoras em com LOS, visto que o próprio corpo do usuário por estar entre as estações (Junsheng 2017, Sklar 2001).

Assim, segue-se o experimento com a retirada de algumas estações da área de cobertura do sistema, diminuindo até duas âncoras no local de testes. A escolha partiu pela retirada de uma âncora de cada padrão de transmissão utilizado, escolhidas de forma arbitrárias. Todos os testes seguiram utilizando como padrão os parâmetros: $Q = 0,38$; $R=1$; e atualização de coordenadas a cada 5 segundos.

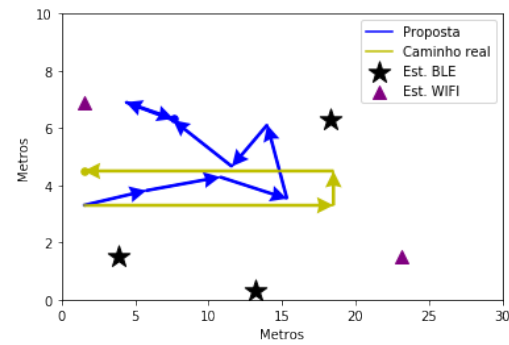
A análise de desempenho utiliza como parâmetro o comportamento do rastreamento por meio da trilateração e do método proposto. Outra forma de analisar o resultado, será utilizar a posição final do trajeto utilizado nos experimentos. Segue na Figura 5.9 um exemplo de visualização do comportamento dos sistemas da trilateração e da proposta a medida que são retiradas algumas das âncoras. Na Tabela 5.7 são demonstradas os erros máximo, médio e mínimo dos sistemas da trilateração e da proposta a medida que são retiradas as âncoras. Por meio dos resultados, é observado o impacto que uma menor área de cobertura de âncoras causa ao sistema. Tal redução disponibiliza, durante a coleta de dados, uma menor quantidade de informações de RSSI e referências fixas a ser utilizados na trilateração, o que ocasiona em maior imprecisão e consequentemente afetar a geração de coordenadas da proposta.

Tabela 5.7: Erro mínimo, máximo e médio dos métodos com alteração do número de âncora.

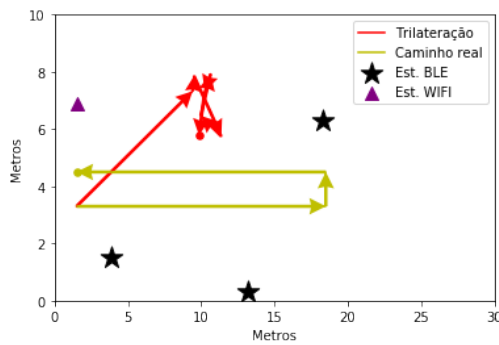
Retirando a âncora (8, 1 ; 5, 7)			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	9,404 m	7,548 m	8,078 m
Proposta	8,878 m	5,673m	6,164 m
Retirando as âncoras (8, 1 ; 5, 7) e (23, 1 ; 1, 5)			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	10,234 m	8,134 m	9,651 m
Proposta	9,788 m	6,637 m	7,671 m
6 âncoras			
Método	Máximo	Mínimo	Médio
Trilateração	5,872 m	1,258 m	2,767 m
Proposta	3,168 m	0,417 m	1,1224 m



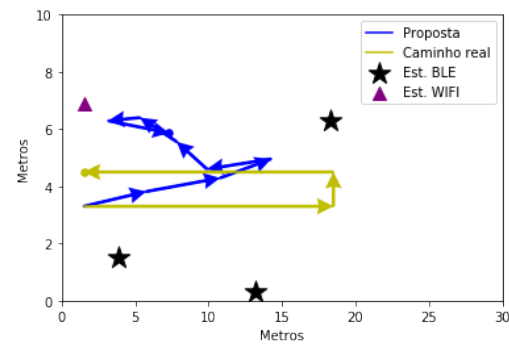
(a) Trilateração com retirada de uma âncora.



(b) Proposta com retirada de uma âncora.



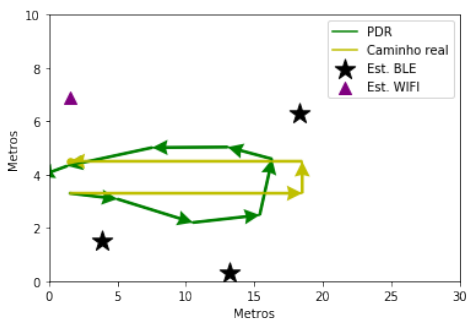
(c) Trilateração com retirada de duas âncoras.



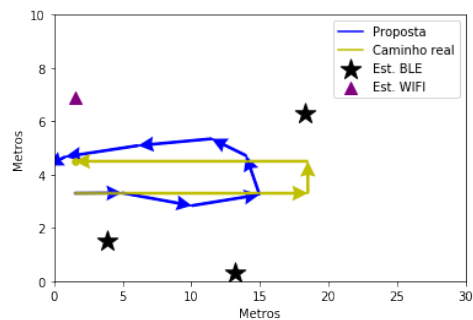
(d) Proposta com retirada de duas âncoras.

Figura 5.9: Impactos na trilateração e método da proposta com retirada das âncoras.

Entretanto, com o uso da interpolação dos dados da trilateração com dados do PDR, as estimativas resultantes do método proposto ainda aferem melhores resultados em relação a trilateração. O que indica uma possibilidade de aferir melhores resultados atribuindo mais confiança ao método do PDR em relação a trilateração com dados da trilateração gerados por uma menor quantidade de âncoras. A exemplo da Figura 5.10, com o uso de 4 âncoras, utilizando 5 segundos de atualização e R igual a 1 e Q igual a 0,038. Como observado, o controle de eficiência da proposta pode ser feito com alteração dos parâmetros do FK.



(a) Caminho Real x PDR.



(b) Caminho Real x proposta (4 âncoras).

Figura 5.10: Correção da proposta com uso de 4 âncoras alterando os parâmetros do FK.

Capítulo 6

Conclusão

Ao longo deste trabalho foram apresentados os requisitos e desafios na geração de uma ILS híbrida, que combina um sistema baseado em redes com um sistema inercial baseado no método PDR, como ilustrado na Figura 6.1. O comportamento de boas respostas do sistema está creditado no comportamento das técnicas base. Como explicado nos Capítulos anteriores, cada método possui suas fontes de impugnações de seus dados, o que gera a necessidade de adição de um método que auxilie no tratamento desses valores. Os métodos de correção apresentados forneceram boas respostas em relação as soluções básicas apresentadas na literatura.

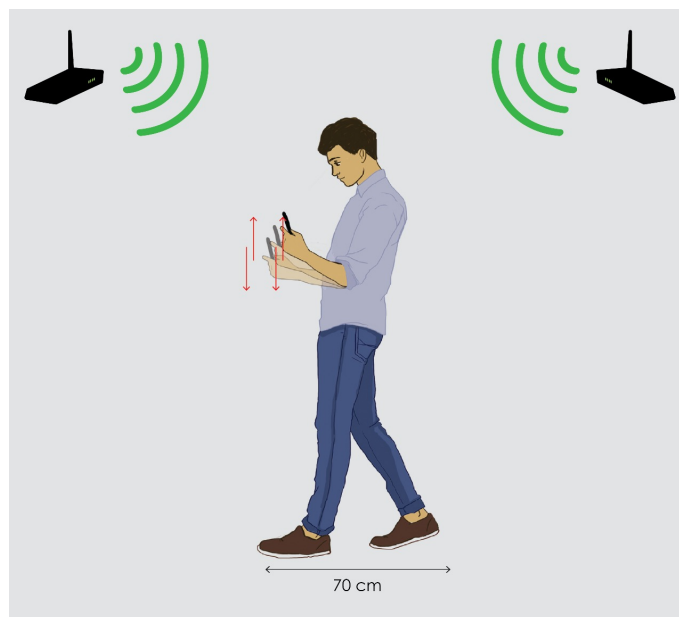


Figura 6.1: Visualização da estimação da coordenada híbrida por base do sistema baseado em redes em combinação com rastreamento do sistema inercial.

O primeiro aprimoramento percebido ocorreu na geração do parâmetro de distância, utilizando uma definição do parâmetro de desvanecimento lento η para cada âncora. O parâmetro representou a densidade de perda de percurso do sinal em seu devido ambiente, e junto ao uso da média de amostras da RSSI, indicando estimações mais precisas da distância entre estação móvel e fixa. Mas, mudanças no ambiente levam a necessidade de

correção do parâmetro, devido a adição de novas estruturas ou equipamentos no ambiente, o que tendem a interferir na permissividade do ambiente.

Outra notável melhoria, para um sistema baseado em redes, está quanto a correção do parâmetro de distância. O uso de um sistema de votação adicionou ao método da trilateração uma nova referência, baseada em uma forma de determinar uma âncora que esteja em LOS com o dispositivo móvel. Com a escolha da âncora de referência como base de correção de estimações de distância, as coordenadas geradas nos testes demonstraram uma melhor precisão, em comparação ao método tradicional com uso apenas do MMQ. Toda via, o método ainda precisa de mais testes, colocando o sistema de correção em outros cenários com espalhamento de âncoras em números e posições diferentes para uma análise mais complementar.

O método PDR mostrou uma boa precisão ao longo da coleta de dados, com boa aproximação da contagem de passo com uso da formulação proposta. Entretanto, parte dos erros do método está quanto ao sistema de orientação, o que gera uma necessidade de melhorar a estimacão da direção do usuário. Outro ruído natural no método ocorre pela diferença de distância percorrida em um passo humano. Cada ato de deslocamento de cada pessoa segue uma distância própria, o que leva a adicionar erros com uso da média, além das diferenças entre distâncias percorridas entre passos de pessoas com alturas diferentes.

O uso do filtro de Kalman demonstrou uma tendência de aprimoramento nas coordenadas, com resoluções que tenderam para respostas mais precisas ao longo do tempo. O controle do método com uso dos indicadores de confiança R e Q fornecem uma poderosa ferramenta, capaz de atualizar a geração de soluções nas mais variadas possibilidades. A exemplo de casos com oclusão entre receptor e âncoras, o sistema pode tendenciar as resoluções para utilizar apenas os dados do PDR. Outra vantagem de controle da sintonia, indica a aplicação do método em situações onde a posição inicial do usuário não seja conhecida, implicando a não confiança e aplicação do PDR, podendo atrelar confiança aos dados da trilateração e corrigir possíveis leituras futuras com auxílio do PDR.

Um ponto a ser destacado na proposta, é a de unificar padrões de transmissão diferentes como sugerido. Mesmo com a indicação de uso de apenas dois padrões tecnológicos diferentes, outros padrões tecnológicos poderiam ser utilizados no conjunto de âncoras, adicionando a possibilidade de uma maior área de cobertura dentro do sistema. Entretanto, vale ressaltar a necessidade do dispositivo móvel ser capaz transmitir e receber dados nos padrões a serem utilizados.

Portanto, a proposta apresentada para gerar uma metodologia para uma ILS para sistemas móveis é capaz de estimar a coordenada do usuário. Não obstante, mesmo com resultados aprimorados em relação aos métodos padrões, o sistema necessita de aprimoramentos. Na Seção 6.1, estão registrados algumas sugestões de trabalhos visando futuras melhorias.

6.1 Trabalhos Futuros

Ao longo deste trabalho, foram apresentados os desafios na geração de uma ILS híbrida e as estratégias utilizadas para sua solução. Como mencionado ao longo do Capítulo,

algumas lacunas dos métodos ficaram em aberto, sendo estas:

- O método PDR necessita de adição de novas correções, principalmente na adição de uma parametrização de distância percorrida por um passo e melhorias na estimação do direcionamento. Dessa forma, o método poderá fornecer melhores resultados;
- O método definição de distância entre estações demonstra a necessidade de algumas melhorias, principalmente por atualização e otimização do parâmetros η , envolvendo a identificação de casos de LOS e NLOS. Junto a este, a adição de um sistema de otimização com objetivo de minimizar os resultados associados as coordenadas geradas, aproximando ainda mais as coordenadas geradas pelo método MMQ;
- Na literatura é possível encontrar outras versões do Filtro de Kalman, que podem se mostrar mais adequadas para a combinação dos métodos. Também é sugerido a adição do filtro de Kalman para os métodos de trilateração e PDR, formando uma cascata de filtros, o que tenderá a melhorar os resultados.

6.2 Publicações

Ao longo deste trabalho, foram realizadas duas publicações em congressos com temas de cidades inteligentes e automação. Na primeira publicação foi trabalhado o tema aplicado a localização em ambientes de cidades inteligentes, utilizando o desvanecimento de larga escala com referência base (2) encontrada na literatura e o sistema de correção, com essa solução aplicada junto ao sistema inercial no filtro de Kalman. Na segunda publicação, foi aplicado apenas o sistema de definição do desvanecimento, em conjunto ao sistema inercial para aplicar no FK.

- Hilário Castro, Ivanovitch Silva e Silvio Costa Sampaio. Uma metodologia de localização Indoor para smartphones em ambientes de Cidades Inteligente. CSBC 2018 - I WBCI. 25 de julho de 2018;
- Hilário Castro, Ivanovitch Silva e Silvio Costa Sampaio. Uma metodologia de localização Indoor híbrida para sistemas móveis. CBA 2018. 9 - 12 de setembro de 2018.

Referências Bibliográficas

- Al-Fuqaha, A., M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari & M. Ayyash (2015), ‘Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications’, *IEEE Communications Surveys Tutorials* **17**(4), 2347–2376.
- Anatel (n.d.), ‘Plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequência no brasil’. <http://www.anatel.gov.br>.
- Anton, Howard & Robert Busby (2011), *Álgebra Linear Contemporânea*, Bookman.
- Bahl, P. & V. N. Padmanabhan (2000), Radar: an in-building rf-based user location and tracking system, *em* ‘Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)’, Vol. 2, pp. 775–784 vol.2.
- Bezerra, André Wilson Lopes (2017), ‘Redes wi-fi i: Antenas’. http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifil/pagina_3.asp.
- Bluetooth (2017), ‘Bluetooth’. <https://www.bluetooth.com/>.
- Bolic, M., M. Rostamian & P. M. Djuric (2015), ‘Proximity detection with rfid: A step toward the internet of things’, *IEEE Pervasive Computing* **14**(2), 70–76.
- Boukerche, Azzedine, Horacio A B F Oliveira, Eduardo Nakamura & Antonio Loureiro (2008), ‘Localization systems for wireless sensor networks’, **14**, 6 – 12.
- Chan, Eddie C. L., George Baciú & S.C. Mak (2010), ‘Properties of channel interference for wi-fi location fingerprinting’, *JOURNAL OF COMMUNICATIONS SOFTWARE AND SYSTEMS* **6**.
- CISCO (2007), ‘Antena omni vs. antena direcional’. https://www.cisco.com/c/pt_br/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html.
- Correa, Alejandro, Marc Barcelo, Antoni Morell & Jose Lopez Vicario (2017), ‘A review of pedestrian indoor positioning systems for mass market applications’, *Sensors* .
- Criscuolo, Cristina, Daniel de Castro Victoria, Edlene Aparecida Monteiro Garçon, Mateus Batistella, Édson Luis Bolfe, Luciane Dourado, Marcos Fernando Nino-miya & Ellen Cristina Teixeira Leite (2013), ‘Gps – global positioning system’. https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_gps.html.

- Developeres (2018), 'Sensormanager'. <https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html>.
- Dil, B. J. & P. J. M. Havinga (2010), On the calibration and performance of rss-based localization methods, *em* '2010 Internet of Things (IOT)', pp. 1–8.
- Dotlic, I., A. Connell, H. Ma, J. Clancy & M. McLaughlin (2017), 'Angle of arrival estimation using decawave dw1000 integrated circuits', pp. 1–6.
- Forouzan, Behrouz A. (2007), *Comunicação de Dados e Redes de Computadores*, 4^{oa} edição, Amgh Editora.
- Frank, Korbinian, Bernhard Krach, Noel Catterall & Patrick Robertson (2009), Development and evaluation of a combined wlan & inertial indoor pedestrian positioning system.
- Gomes, Ruan, Marcelo Alencar, I.E. Fonseca & A.C. Lima Filho (2013), 'Desafios de redes de sensores sem fio industriais', **4**, 16–27.
- Han, D., S. Jung, M. Lee & G. Yoon (2014), 'Building a practical wi-fi-based indoor navigation system', *IEEE Pervasive Computing* **13**(2), 72–79.
- Harter, Andy, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward & Paul Webster (2002), 'The anatomy of a context-aware application', *Wireless Networks* **8**(2), 187–197.
URL: <https://doi.org/10.1023/A:1013767926256>
- Hossain, A.K.M. Mahtab & Wee-Seng Soh (2015), 'A survey of calibration-free indoor positioning systems', *Computer Communications* **66**, 1 – 13.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366415001115>
- ibeacon (2018), 'ibeaconinsider'. <http://www.ibeacon.com/>.
- IEEE (2017), 'Ieee 802 lan/man standards committee'. <http://www.ieee802.org/>.
- INNOVENTIONS (2017), 'Magnetometer in smartphones and tablets'. <http://www.rotoview.com/magnetometer.htm>.
- Integrated, Maxim (2017), 'Accelerometer and gyroscopes sensors: Operation, sensing, and applications'. <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5830>.
- Jain, Preeti (2012), 'Magnetometers'. <https://www.engineersgarage.com/articles/magnetometer>.
- Jimenez, A. R., F. Seco, C. Prieto & J. Guevara (2009), A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost mems imu, *em* '2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing', pp. 37–42.

- Jin, Y., Hong-Song Toh, W. S. Soh & Wai-Choong Wong (2011), A robust dead-reckoning pedestrian tracking system with low cost sensors, *em* '2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)', pp. 222–230.
- Junior, Sérgio Luiz Sambugari (2016), Aplicação de filtro de kalman para filtragem de sinais da rede elétrica, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Londrina.
- Junsheng, Hu (2017), Wireless industrial indoor localization and its application, Dissertação de mestrado, The Arctic University of Norway, Hansine Hansens veg 18, 9019 Tromsø, Noruega.
- Kalman, Rudolf Emil (1960), 'A new approach to linear filtering and prediction problems', *Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering* pp. 35–45.
- Kang, W. & Y. Han (2015), 'Smartpdr: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization', *IEEE Sensors Journal* **15**(5), 2906–2916.
- Kayton, M. (2002), 'Global positioning system: signals, measurements, and performance [book review]', *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* **17**(10), 36–37.
- Kent, Linda Tarr (2017), 'Distância média do passo de corrida'. http://www.ehow.com.br/distancia-media-passo-corrida-info_8070/.
- Khalajmehrabadi, Ali, Nikolaos Gatsis & David Akopian (2017), 'Modern wlan fingerprinting indoor positioning methods and deployment challenges', *IEEE communications Surveys & Tutorials* **19**, 1974–2002.
- Khan, R., S. U. Khan, R. Zaheer & S. Khan (2012), Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges, *em* '2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology', pp. 257–260.
- Klepeis, NE, WC Nelson, WR Ott, JP Robinson, AM Tsang, P Switzer, JV Behar, SC Hern & WH Engelmann (2001), *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants*, Vol. Vol. 11, Nature.
- Koo, B., S. Lee, S. Kim & C. Sin (2014), Integrated pdr/fingerprinting indoor location tracking with outdated radio map, *em* 'TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference', pp. 1–5.
- Kurose, James F. & Keith W. Ross (2014), *Redes de computadores e a internet: Uma abordagem Top-Down*, 6^ª edição, Pearson.
- Lan, Kun-Chan & Wen-Yuah Shih (2013), 'On calibrating the sensor errors of a pdr-based indoor localization system', *Sensors* **13**(4), 4781–4810.
URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/4/4781>

- Li, Y., Y. Zhuang, H. Lan, Q. Zhou, X. Niu & N. El-Sheimy (2016), ‘A hybrid wifi/magnetic matching/pdr approach for indoor navigation with smartphone sensors’, *IEEE Communications Letters* **20**(1), 169–172.
- Lin, X. Y., T. W. Ho, C. C. Fang, Z. S. Yen, B. J. Yang & F. Lai (2015), A mobile indoor positioning system based on ibeacon technology, *em* ‘2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)’, pp. 4970–4973.
- Liu, Yu, Yanping Chen, Mu Zhou, Yibing Wang, Shuang Gong & Xin Zhang (2015), ‘Multi-mode dynamically switching pedestrian navigation using smart phone inertial sensors’, *Journal of Communications* **10**.
- Madigan, D., E. Einahrawy, R. P. Martin, W. H. Ju, P. Krishnan & A. S. Krishnakumar (2005), Bayesian indoor positioning systems, *em* ‘Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.’, Vol. 2, pp. 1217–1227 vol. 2.
- Makki, Ahmed, Abubakr Siddig, Mohamed Saad & Chris Bleakley (2015), ‘Survey of wifi positioning using time-based techniques’, *Computer Networks* **88**, 218 – 233.
- Malm, André (2017), ‘Berg insight: “mobile location based services,”’. <http://www.berginsight.com/reportpdf/productsheet/bi-lbs8-ps.pdf>.
- Mao, Guoqiang, Barış Fidan & Brian D.O. Anderson (2007), ‘Wireless sensor network localization techniques’, *Computer Networks* **51**(10), 2529 – 2553.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128606003227>
- Milette, Greg & Adam Stroud (2012), *Professional Android Sensor Programming*, Wrox.
- Misra, P. & P. Enge (2006), *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Vol. 2^o.
- Morimoto, Carlos E. (2008), ‘Redes wireless’. <http://www.hardware.com.br/tutoriais/redes-wireless/>.
- Motter, P., R. S. Allgayer, I. Müller, C. E. Pereira & E. Pignaton de Freitas (2011), ‘Practical issues in wireless sensor network localization systems using received signal strength indication’, pp. 227–232.
- Munoz Diaz, Estefania (2015), ‘Inertial pocket navigation system: Unaided 3d positioning’, *Sensors* **15**(4), 9156–9178.
URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/4/9156>
- Najme, Ms, Zehra Naqvi, Ashwani Kumar, Aanchal Chauhan & Kritka Sahni (2012), ‘Step counting using smartphone-based accelerometer’, **4**.
- NASA (2017), ‘Global positioning system history’. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html.

- Newman., N. (2014), 'Apple ibeacon technology briefing', *Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice* **15**, 222–225.
- Nuño-Barrau, Galo & José M. Páez-Borralló (2006), 'A new location estimation system for wireless networks based on linear discriminant functions and hidden markov models', *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* **2006**(1), 068154.
URL: <https://doi.org/10.1155/ASP/2006/68154>
- Ojeda, L. & J. Borenstein (2007), Personal dead-reckoning system for gps-denied environments, *em* '2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics', pp. 1–6.
- OnkarPathak, Pratik Palaskar, Rajesh Palkar & Mayur Tawari (2014), 'Wi-fi indoor positioning system based on rssi measurements from wi-fi access points—a tri-lateration approach', *International Journal of Scientific & Engineering Research* **4**.
- Paoli, Orlando Augusto Moreira De (2016), 'Seção: Tutoriais telefonia celular'. http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallocgsm1/pagina_4.asp.
- Peneda, L., A. Azenha & A. Carvalho (2009), 'Trilateration for indoors positioning within the framework of wireless communications', pp. 2732–2737.
- Persson, K.E., D. Manivannan & M. Singhal (2005), 'Bluetooth scatternets: criteria, models and classification', *Ad Hoc Networks* **3**(6), 777 – 794.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870504000290>
- Pivato, P., L. Palopoli & D. Petri (2011), 'Accuracy of rss-based centroid localization algorithms in an indoor environment', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **60**(10), 3451–3460.
- Postscapes (2017), 'An overview of protocols involved in internet of things devices and applications. help clarify with iot layer technology stack and head-to-head comparisons'. <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>.
- Prasad, R. & T. Ojanpera (1998), A survey on cdma: evolution towards wideband cdma, *em* '1988 IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Proceedings. Spread Technology to Africa (Cat. No.98TH8333)', Vol. 1, pp. 323–331 vol.1.
- Radu, V. & M. K. Marina (2013), 'Himloc: Indoor smartphone localization via activity aware pedestrian dead reckoning with selective crowdsourced wifi fingerprinting', pp. 1–10.
- Rappaport, Theodore S. (2001), *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd^a edição, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall PTR.
- Ruiz, A. R. Jimenez, F. Seco Granja, J. C. Prieto Honorato & J. I. Guevara Rosas (2012), 'Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted

- imu and rfid measurements', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **61**(1), 178–189.
- Rusli, M. E., M. Ali, N. Jamil & M. M. Din (2016), 'An improved indoor positioning algorithm based on rssi-trilateration technique for internet of things (iot)', pp. 72–77.
- Röbesaat, Jenny, Peilin Zhang, Mohamed Abdelaal & Oliver Theel (2017), 'An improved ble indoor localization with kalman-based fusion: An experimental study', *Sensors* **17**(5).
- Sakpere, Wilson, Michael Adeyeye Oshin & Nhlanhla BW Mlitwa (2017), 'A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies', *South African Computer Journal*.
- SensorEvent* (2017). <https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorEvent.html>.
- Silva, Leandro Aureliano da (2007), Filtros de kalman no tempo e frequência discretos combinados com subtração espectral, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (USP).
- Sklar, Bernard (2001), *DIGITAL COMMUNICATIONS: Fundamentals and Applications*, 2nd^a edição, Prentice Hall P T R, Upper Saddle River, New Jersey 07458, ISBN=0130847887.
- Smithsonian (2018), 'Dead reckoning'. <https://timeandnavigation.si.edu/navigating-at-sea/navigating-without-a-clock/dead-reckoning>.
- Tan, Godfrey, Allen Miu, John Gutttag & Hari Balakrishnan (2001), 'Forming scatternets from bluetooth personal area networks'.
- Tanenbaum, Andrew S. & David Wetherall (2011), *Redes de computadores*, 5^{oa} edição, Pearson.
- Tanghe, E., W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. V. Herwegen & W. Vantomme (2008), 'The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 mhz', *IEEE Transactions on Wireless Communications* **7**(7), 2740–2751.
- Tarrío, Paula, Juan A. Besada & José R. Casar (2013), 'Fusion of rss and inertial measurements for calibration-free indoor pedestrian tracking', *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion* pp. 1458–1464.
- Wei, Wang, Xiong Jin-Yu & Zhu Zhong-Liang (2005), 'A new nlos error mitigation algorithm in location estimation', *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **54**(6), 2048–2053.

- Wu, Chao-Lin, Li-Chen Fu & Feng-Li Lian (2004), 'Wlan location determination in e-home via support vector classification', **2**, 1026–1031 Vol.2.
- YDOP (2017), 'What is a 'localized business'?'. <https://www.ydop.com/near-user/localized-business/>.
- Zhu, Xiuming, Pei-Chi Huang, Jianyong Meng, Song Han, Aloysius K. Mok, Deji Chen & Mark Nixon (2014), 'Colloc: A collaborative location and tracking system on wirelessmart', *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* **13**(4s), 125:1–125:24.
URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2584656>